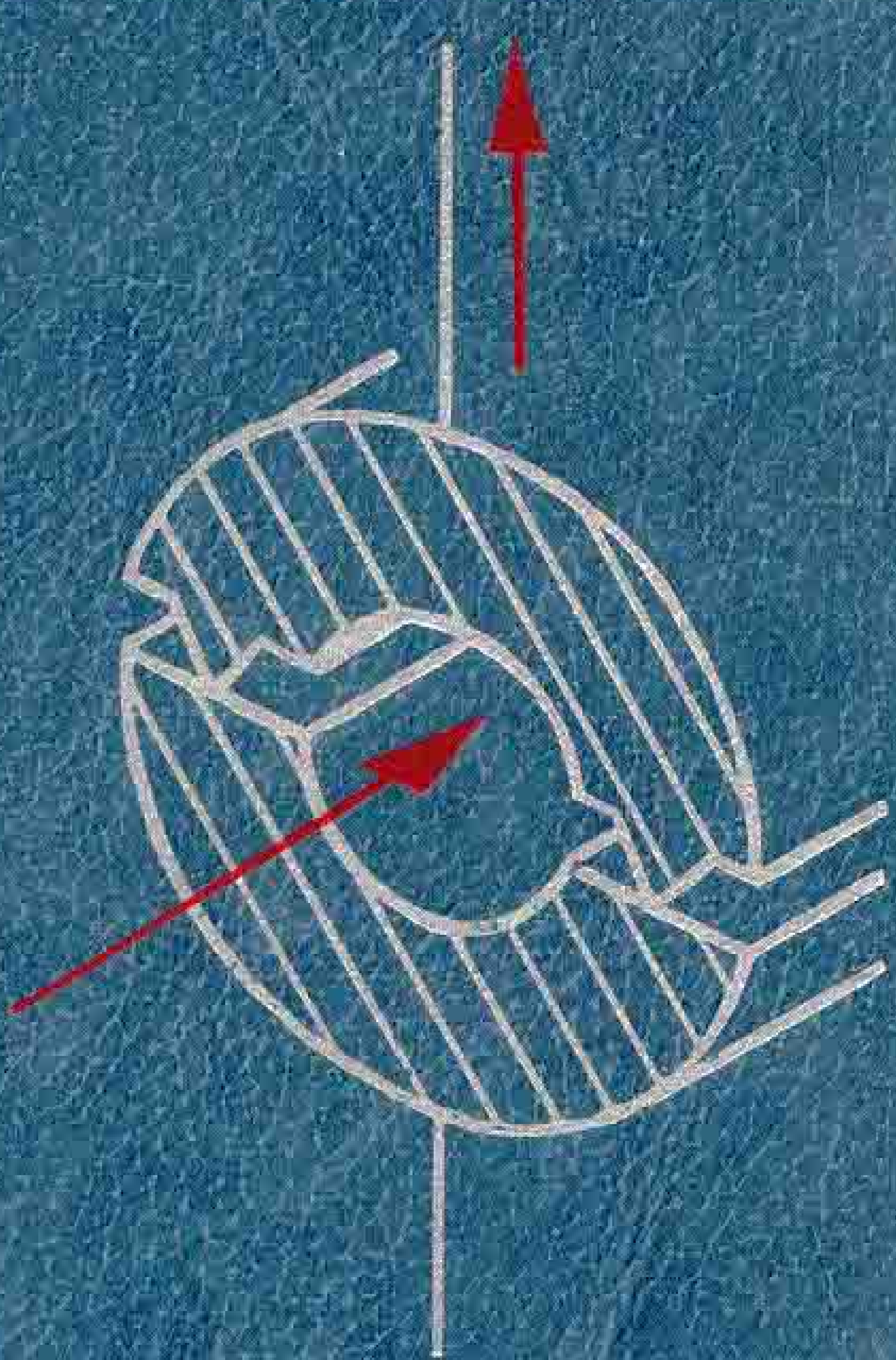
БИОГЕННЫЙ МАГНЕТИТ И МАГНИТОРЕЦЕПЦИЯ

НОВОЕ О БИОМАГНЕТИЗМЕ

1



Издательство «Мир»

MAGNETITE BIOMINERALIZATION AND MAGNETORECEPTION IN ORGANISMS

A NEW BIOMAGNETISM

EDITED BY

Joseph L. Kirschvink

CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY
PASADENA, CALIFORNIA

Douglas S. Jones

UNIVERSITY OF FLORIDA
GAINESVILLE, FLORIDA

AND

Bruce J. MacFadden

FLORIDA STATE MUSEUM
UNIVERSITY OF FLORIDA
GAINESVILLE, FLORIDA

PLENUM PRESS
NEW YORK AND LONDON

БИОГЕННЫЙ МАГНЕТИТ И МАГНИТОРЕЦЕПЦИЯ

НОВОЕ О БИОМАГНЕТИЗМЕ

В 2-Х ТОМАХ

Под редакцией

Дж. Киршвинка, Д. Джонса, Б. Мак-Фаддена

Том 1

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО
ПОД РЕДАКЦИЕЙ
Д-РА ФИЗ.-МАТ. НАУК
В. А. Троицкой
И
Д-РА БИОЛ. НАУК
Ю. А. Холодова

МОСКВА
«МИР»
1989

ББК 28.071
Б63
УДК 57.049

Биогенный магнетит и магниторецепция. Новое о био-
Б63 магнетизме: В 2-х т. Т.1: Пер. с англ./Под ред. Дж. Киршвинка, Д. Джонса, Б. Мак-Фаддена.– М.: Мир, 1989.– 353 с., ил.
ISBN 5-03-001274-5

Монографический сборник американских авторов – первый в мировой литературе обобщающий труд по магнитобиологии. В т. 1 собрана исчерпывающая информация о наблюдаемых биологических эффектах магнитного поля, сформулированы концепции относительно их физических основ.

Для специалистов-биологов (биофизиков, физиологов, зоологов, микробиологов, палеонтологов), медиков, геофизиков.

Б $\frac{2007020000-512}{041(01)-88}$ 149–88, ч.1 ББК 28.071

Редакция литературы по биологии

ISBN 5-03-001274-5 (русск.)
ISBN 5-03-001273-7
ISBN 0-306-41993-9 (англ.)

© 1985 Plenum Press, New York
© перевод на русский язык, «Мир», 1989

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРОВ ПЕРЕВОДА

Предлагаемая советскому читателю монография по биогенному магнетиту является уникальным изданием и отражает достижения последних лет в той междисциплинарной области знаний, которую можно отнести к магнитоэкологии, поскольку она связана с исследованием восприятия магнитного поля Земли живыми организмами. Работы в этой области наиболее активно ведутся в США.

Внимание научной общественности в СССР к проблемам магнитоэкологии было привлечено трудами В. И. Вернадского и А. Л. Чижевского еще в первой половине нашего столетия. Начиная с 60-х годов поток информации по влиянию естественных магнитных полей на биологические объекты непрерывно увеличивался. Однако физики встретили эти сведения со значительной долей скептицизма, поскольку первичный физико-химический механизм влияния геомагнитного поля на биологические системы оставался неясным. Обнаружение биогенного магнетита сначала у микроорганизмов (1975 г.), а затем и у самых разных представителей животного мира, включая человека, заполняет существенный пробел в магнитоэкологии. Создается впечатление, что у многих организмов имеется своя «магнитная стрелка» в виде частиц магнетита, благодаря чему они могут ориентироваться в геомагнитном поле.

Перелетные птицы при дальних миграциях, голуби при возвращении к своей голубятне, пчелы во время танца, извещающего о местонахождении взятка,– все они используют информацию о геомагнитном поле, полученную с помощью магнетита. В литературе возник своеобразный «магнетитовый бум». В самых разных журналах публикуются сведения об обнаружении магнетита у рыб, китов, бабочек, летучих мышей.

Все эти разрозненные сведения собраны в настоящем издании. Редакторам удалось объединить разных специалистов, которые в меру своих сил и способностей осветили многие стороны нового направления исследований в биофизике. Редакторы книги называют все это направление биомагнетизмом или биогенным ферромагнетизмом. Нам кажется более удачным второй термин. Следует, однако, подчеркнуть, что терминология в этой сравнительно новой области биофизики еще не устоялась и, в частности, первоначально «биомагнетизмом» называли диагностическое направление в медико-биологических дисциплинах, связанное с регистрацией сверхслабых магнитных полей, порождаемых биотоками. Наиболее впечатляющие результаты здесь достигнуты в области нейромагнетизма и кардиомагнетизма, которые отражены в двух недавно вышедших монографиях на русском языке (Введенский, Ожогин, 1986; Холодов и др.,

1987). Вообще говоря, принято разделять понятия «биомагнетизм» и «магнитобиология». Исследования в области биомагнетизма имеют целью изучение магнитных полей, создаваемых самими организмами, а предметом магнитобиологии является исследование реакций организмов на магнитные поля. Однако авторы данной книги предпочитают не делать такого разграничения и называют явления, относящиеся к той и другой областям исследований, биомагнетизмом.

Надо помнить также о наличии многих первичных механизмов биологического действия магнитных полей (например, ЭДС, индукция). Авторы признают, что имеется магниторецепция без участия магнетита (например, у электрических рыб) и что биогенный магнетит может не иметь отношения к магниторецепции (например, у неподвижных форм жизни). Как и во всякой новой области знаний, в биомагнетизме еще много нерешенных проблем, но основная идея о наличии магнетитовой магниторецепции оказалась плодотворной. Ее появление тесно связано с развитием сверхчувствительной магнитометрии на основе сквидов, созданием экранированных помещений, использованием немагнитных материалов в исследованиях.

Существенным результатом проведенных исследований является получение экспериментальных доказательств того, что магнетит может образовываться в самом организме, т. е. имеет биогенное происхождение, хотя механизм его образования может быть неодинаков у представителей разных таксономических единиц. Наиболее интересен путь возникновения «магнетитового органа» у магниточувствительных бактерий, где однодоменные частицы магнетита формируют новую органеллу, названную магнитосомой.

Исследования, представленные в данной монографии, выполнены на самом современном уровне физического эксперимента, включающем использование просвечивающей электронной микроскопии, электронной дифракции, мёссбауэровской спектроскопии и т. д.

Дополнительную текущую информацию о влиянии естественных и искусственных магнитных полей на биологические системы заинтересованный читатель может получать из информационного листка «Биологическое действие электромагнитных, магнитных и электрических полей», издаваемого с 1976 г. Библиотекой по естественным наукам АН СССР. Можно сослаться также на некоторые публикации, где обобщены результаты по магнитогигиене («Механизмы биологического действия электромагнитных излучений», 1987) и магнитотерапии (Райгородский и др., 1987), а также биологическому действию переменной составляющей геомагнитного поля (Сидякин и др., 1985), магнитных аномалий (Травкин, 1971) и гипомагнитной среды (Копанев, Шакула, 1985). Роль магнитных свойств биологических систем в их реакциях на внешнее магнитное поле обсуждается в монографии Павловича (Павлович, 1981).

В заключение следует отметить, что новые данные, приведенные в книге, существенно расширяют наши представления о биоминерализации магнетита и особенностях структуры и локализации возможных рецепторов магнитного поля. Несомненный интерес представляет также постановка новых задач и определение путей исследований, необходимость которых стала очевидной в свете полученных результатов.

Книгу переводили: Шуранова Ж. П. (предисловие, гл. 6, 7, 20, 22, 25–34), Гуртовой К. Г. (гл. 2, 4, 8), Мулкиджанян А. Я. (гл. 1, 13–15), Назарова Е. А. (гл. 3, 35, 36), Следь В. Д. (гл. 5, 17–19), Камчатнов А. М. (гл. 9–12), Верховская М. Л. (гл. 16, 21, 23, 24).

В. А. Трошкая
Ю. А. Холодов

Литература

Введенский В. Л., Ожогин В. И. Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм.– М.: Наука, 1986.

Копанев В. И., Шакула А. В. Влияние гипогеомагнитной среды на биологические объекты.– Л.: Наука, 1985.

Механизмы биологического действия электромагнитных излучений.– Пущино, ИБФ АН СССР, 1987.

Павлович С. А. Магниточувствительность и магнитовосприимчивость микроорганизмов.– Минск: Беларусь, 1981.

Райгородский Ю. М., Курдин Ю. А., Филлипов Ю. В., Блохина Ю. А. Применение искусственных магнитных полей в экспериментальной и клинической медицине.– М.: ЦНИИ «Электроника», 1987, часть II.

Сидякин В. Г., Тимурьянц Н. А., Макеев В. М., Владимирский Б. М. Космическая экология.– Киев: Наукова думка, 1985.

Травкин М. П. Магнитное поле и жизнь.– Белгород, Белгородский педагогический институт, 1971.

Холодов Ю. А., Козлов А. Н., Горбач А. М. Магнитные поля биологических объектов.– М.: Наука, 1987.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вопрос о том, как мигрирующие животные находят дорогу, будучи в незнакомой местности, издавна волновал людей, а в последние десятилетия он стал предметом плодотворных исследований. Используют ли живые организмы магнитное поле Земли при навигации? Начиная по крайней мере с середины прошлого века этот вопрос неоднократно то привлекал к себе внимание, то снимался с повестки дня. Вообще говоря, эта проблема находилась вне основного русла научных исследований по двум причинам: во-первых, из-за невоспроизводимости многих поведенческих опытов, которые, как вначале предполагалось, свидетельствуют о наличии «магнитного чувства»; во-вторых, из-за теоретических трудностей, возникающих при попытке биофизиков понять, как может функционировать соответствующая сенсорная система. Однако с середины 60-х годов в связи с развитием этологии (науки о поведении животных) и благодаря исследованиям, проведенным на пчелах и птицах, стало ясно, что геомагнитное поле все-таки используется ими в определенных условиях. По мере обнаружения все большего и большего числа животных, обладающих подобными свойствами, вновь возник старый вопрос о механизме магниторецепции. Из различных вариантов, предложенных для объяснения способа преобразования информации о геомагнитном поле нервной системой, лучше всего широкий круг наблюдаемых эффектов объясняет, по-видимому, гипотеза магниторецепции, основанной на магнетите. Она подробно обсуждается в данной книге, хотя в чистом виде наличие этого механизма доказано только для бактерий, обнаруживающих магнитотаксис.

Далее возникает вопрос, насколько правильным является определение, предложенное для этой новой области исследования. Согласно Уильямсону и Кауфману (Williamson, Kauffman, 1980), биомагнетизм включает в себя изучение магнитных полей, создаваемых живыми организмами, а магнитобиология занимается исследованием ответов на магнитные поля или же детектированием их живыми существами. Несостоятельность такого разграничения совершенно очевидна в случае бактерий, обладающих магнитотаксисом, у которых магнетит является источником сильных локальных магнитных полей (свыше 0,4 Тл у конца магнитосомы) и в то же время ответствен за магнитотаксис. Поэтому мы предпочитаем использовать термин *биомагнетизм* (или *биогенный ферромагнетизм*), когда речь идет об исследованиях, которые направлены на выявление биогенного магнетита, по той простой причине, что гораздо легче обнаружить очень малые концентрации ферромагнитного материала в тканях, чем определить, используется ли он вообще и если да, то для какой цели.

В 1981 г. в Сан-Франциско мы организовали симпозиум по биоминерализации магнетита в рамках Американского геофизического союза. Это было связано прежде всего с тем, что большинство исследований в области биомагнетизма проводилось в лабораториях, традиционно занимающихся изучением магнетизма минералов и палеомагнетизма. Цель этого симпозиума состояла в том, чтобы объединить ученых, работающих над разными аспектами проблемы биоминерализации магнетита; он привлек большое количество ученых разных специальностей – физиков, геологов, биологов. На симпозиуме был поставлен вопрос о том, что литература, относящаяся к этой области биомагнетизма, рассредоточена по самым разным научным журналам – от бактериологических до геофизических, и отсутствует единый источник, к которому можно было бы обратиться, чтобы глубже изучить предмет или получить представление об общем состоянии проблемы. Предлагаемая книга как раз и является попыткой заполнить этот пробел. Разнообразие затронутых в ней вопросов указывает на то, что нам удалось охватить достаточно широкий круг явлений, относящихся к данной теме, и мы надеемся, что в будущем эта книга послужит источником основных ссылок. В монографии рассмотрено большинство аспектов биоминерализации магнетита, детально обсуждаются процессы биоминерализации (гл. 1, 5, 15, 16), физические свойства магнетита, которые ответственны за его отличие от других биогенных оксидов железа (гл. 2), а также вопрос о том, какие параметры геомагнитного поля могут использоваться магниточувствительными организмами (гл. 3). Организмы, чувствительные к геомагнитному полю и в то же время обладающие способностью к биохимическому осаждению магнетита, весьма разнообразны (гл. 13–25). Хотя ферромагнитная гипотеза магниторецепции была впервые высказана и экспериментально проверена, по-видимому, еще в 1945 г. Густавом Изингом (G. Ising, 1945), теоретическое обоснование она получила лишь в наше время; ее дальнейшему развитию посвящены гл. 10 и 11. В гл. 9 она обсуждается в связи с возможностью использования индукционного механизма магниторецепции. В последние несколько лет был достигнут большой прогресс и в разработке соответствующих лабораторных методик, что позволяет обнаруживать и идентифицировать очень малые (до нанограмма) количества ферромагнитного материала. Сюда входят создание сквидов – высокочувствительных магнитометров со сверхпроводящими квантовыми интерферометрическими датчиками (гл. 4), разработка недорогих способов магнитного экранирования (гл. 8), применение методики экстракции магнетита Уокера и др. (гл. 5) и мёссбауэровской спектроскопии в модификации Френкеля и др. (гл. 13), а также постоянно совершенствующейся методики электронной микроскопии (гл. 6, 7, 15). В заключение рассмотрен вопрос о том, можно ли найти следы кристаллов магнетита, образованные магниточувствительными бактериями, в окаменелостях; разные точки зрения на этот счет обсуждаются в гл. 35 и 36. Обнаружение

таких «магнитофоссилий» могло бы объяснить высокую магнитную стабильность многих глубоководных отложений и определить истинный диапазон концентраций кислорода в придонных водных слоях древних морей.

В книгу включена также глава, посвященная вопросу о том, способны ли приматы к биохимическому осаждению магнетита и обладает ли человек магниточувствительностью, сходной с таковой у других животных. Как отмечают редакторы во введении к упомянутой главе, этот последний вопрос породил гораздо больше споров, чем какой-либо другой из рассмотренных в данной книге. Поэтому мы расширили его, включив сюда обсуждение этого вопроса учеными, придерживающимися противоположных точек зрения. Мы предлагаем читателю тщательно изучить этот материал и сформулировать свое собственное мнение с учетом всех имеющихся данных, причем важнее всего то, что такое обсуждение будет способствовать дальнейшему изучению этой трудной проблемы.

Большой вклад в развитие гипотезы магниторецепции, основанной на магнетите, внесли достижения и в некоторых областях науки, отличных от этологии. Один из примеров такого рода – экспериментальное и теоретическое определение размеров однодоменных частиц магнетита (Néel, 1955; Evans, McElhinny, 1969; Butler, Banerjee, 1975). Несомненно, однако, что уникальным и исключительно важным открытием была идентификация магнетита в зубцах хитона (H. Lowenstam, 1962 a). Последовательная работа по биоминерализации, которую провели Ловенстам и его ученики (Lowenstam, 1963, 1967, 1974, 1980, 1981; Towe, Lowenstam, 1967; Kirschvink, Lowenstam, 1979; Lowenstam, Weiner, 1983), открыла новую эру систематических исследований процесса биоминерализации. Обнаружение магнитных свойств у радулы хитона, не получившее в свое время должной оценки, явилось на самом деле первым примером биомагнитного эффекта. Общепринятое же «обоснование» биомагнетизма – измерение магнитного поля, создаваемого сердцем,– было дано лишь в следующем году (Baul, McFee, 1963).

История о том, как Ловенстам пришел к открытию магнетита в зубцах хитона, до сих пор не освещалась в печати, хотя она представляет собой один из наиболее интересных примеров работы превосходного натуралиста. После того, как нацисты дважды не давали ему возможность защитить докторскую диссертацию в Мюнхенском университете (поскольку он был евреем), он в 1937 г. эмигрировал из Германии в США. Во время второй мировой войны Ловенстам несколько лет работал в качестве палеонтолога в Геологическом управлении в Иллинойсе, а затем в Чикагском университете. Поскольку финансирование выездов на полевые работы было скудным, он изучал силурийские рифы в районе Чикаго, куда легко было добраться на общественном транспорте. В результате этих исследований Ловенстам сделал заключение о структуре экологических сообществ в рифах и окружающих отложениях и, основываясь на совокупности ископаемых, которые здесь присутствовали, сумел определить их удаленность от устойчивых к воздействию волн рифовых структур (Lowenstam, 1950). Как оказалось, это было существенным шагом, позволившим локализовать близповерхностные нефтяные залежи на основе разведочного бурения в рифах с окаменелостями,– методики, которую быстро взяли на вооружение многие нефтяные компании.

После перехода в Калифорнийский технологический институт в 1952 г. Ловенстам расширил свои исследования ископаемых рифовых сообществ, включив сюда третичные отложения, найденные на тропических островах центральной части Тихого океана, в особенности на Палау. Благодаря изменению уровня моря в последние несколько миллионов лет многие из этих рифов сейчас находятся на суше и легко доступны для исследования. Ловенстам заметил, что когда эти массы известняка обнажались около зоны прилива, они часто оказывались разрушенными и имели характерную грибообразную форму. Эти «обгрызанные» островки были покрыты растительностью, и нередко у их основания плескались волны (Lowenstam, 1974). В то время геоморфологи считали, что эрозия в приливной зоне обусловлена действием приливов, но, по-видимому, в том случае, который наблюдал Ловенстам, дело было в другом. Он заметил, что глубина локальных разрушений возрастала при переходе от зоны активных приливов в более спокойные воды лагун, и, следовательно, действие волн как источника разрушений исключалось. При более тщательном осмотре Ловенстам обнаружил, что известняки с активной эрозией были сильно исчерчены параллельными полосами, похожими на следы резца. Как оказалось, полосы были оставлены зубцами хитонов. Это было поистине удивительным, поскольку известняк гораздо тверже хитина, который считался основным структурным компонентом зубцов радулы у всех моллюсков. Однако зубцы несомненно разрушали камень, и этому следовало найти какое-то простое объяснение. Осмотр радулы показал, что пары больших боковых зубцов содержат твердый поблескивающий темный материал, который при последующем анализе был идентифицирован как магнетит. В течение многих лет специалисты – минерологи и биологи скептически относились к тому, что материал зубцов имеет биохимическую природу, а не является частицами неорганического происхождения, просто ассимилированными из окружающей среды. Считалось, что магнетит может образовываться при высоких температурах и давлениях в изверженных и метаморфических породах, и его осаждение в зубцах моллюска, осуществляющееся биохимическим путем, было полной неожиданностью.

В 1981 г. Хайнц Ловенстам все-таки получил ученую степень доктора философии в Мюнхенском университете как признание прекрасных качеств его работы и как частичную компенсацию за прежнюю несправедливость.

Литература

Baule G.M., McFee R. (1963). Detection of the magnetic field of the heart, Am. Heart J., **66**, 95–96.

Butler R.F., Banerjee S.K. (1975). Theoretical single-domain grain size range in magnetite and titanomagnetite, J. Geophys. Res., **80**, 4049–4058.

Evans M.E. McElhinny M.W. (1969). An investigation of the origin of stable remanence in magnetite bearing igneous rocks, J. Geomagn. Geoelectr., **21**, 757–773.

Ising G. (1945). Die physicalische Möglichkeit eines tierschen Orientierungssines auf Basics der Endrotation, Ark. Mat. Astron. Fys., **32A** (18), 1–23.

Kirschvink J.L., Lowenstam H.A. (1979). Mineralization and magnetization of chiton teeth: Paleomagnetic, sedimentologic, and biologic implications of organic magnetite, Earth Planet. Sci. Lett., **44**, 193–204.

Lowenstam H.A. (1950). Niagaran reefs in Illinois and their relation to oil accumulation, Oil Gas J., **48**, 49–77.

Lowenstam H.A. (1962a). Magnetite in denticle capping in recent chitons (Polyplacophora), Bull. Geol. Soc. Am., **73**, 435–438.

Lowenstam H.A. (1962b). Goethite in radular teeth of recent marine gastropods, Science, **137**, 279–280.

Lowenstam H.A., 1963. Biologic problems relating to the composition and diagenesis of sediments. In: The Earth Sciences: Problems and Progress in Current Research (T.W. Donnelly, ed.), University of Chicago Press, Chicago, pp. 137–195.

Lowenstam H.A. (1967). Lepidocrocite, an apatite mineral, and magnetite in teeth of chitons (Polyplacophora), Science, **156**, 1373–1375.

Lowenstam H.A. (1968). Weddellite in a Marine Gastropod and in Antarctic Sediments, Science, **162**, 1129–1130.

Lowenstam H.A. (1972). Phosphate hard tissues of marine invertebrates: their nature and mechanical function, and some fossil implications, Chem. Geol., **9**, 153–166.

Lowenstam H.A., 1974. Impact of life on chemical and physical processes. In: The Sea, Volume 5 (E.D. Goldberg, ed.), Wiley, New York, pp. 715–796.

Lowenstam H.A., 1980. Bioinorganic constituents of hard parts. In: Biogeochemistry of Amino Acids (P.E. Hare, T.D. Hoering, and K. King, Jr., eds.), Wiley, New York, pp. 3–16.

Lowenstam H.A. (1981). Minerals formed by organisms, Science, **211**, 1126–1131.

Lowenstam H.A., 1984. Biomineralization processes and products and the evolution of biomineralization, 27th Int. Geol. Congr. Sect. Paleontol. Theme C. 02.1.5.

Lowenstam H.A., Weiner S., 1983. Mineralization by organisms, and the evolution of biomineralization. In: Biomineralization and Biological Metal Accumulation (P. Westbroek and E.W. de Jong, eds.), Reidel, Dordrecht, pp. 191–203.

Neel L. (1955). Some theoretical aspects of rock magnetism, Philos. Mag. Suppl. Adv. Phys., **4**, 191–243.

Towe K.M., Lowenstam H.A. (1967). Ultrastructure and development of iron mineralization in the radular teeth of *Cryptochiton stelleri* (Mollusca), J. Ultrastruct. Res., **17**, 1–13.

Williamson S.J., Kaufman L. (1980). Biomagnetism, J. Magn. and Magn. Mater., **22**, 129–201.

Введение в проблему I

За последние 10 лет благодаря появлению новых данных в трех относящихся к наукам о Земле областях исследования (биоминерализации, магнетизме горных пород и геомагнетизме) мы стали гораздо лучше понимать, как организмы реагируют на геомагнитные воздействия. Поскольку для плодотворного изучения биогенного ферримагнетизма глубокое понимание явлений, относящихся к этим областям науки, совершенно необходимо, во вводной части этого тома каждой из них посвящено по главе, причем авторы постарались изложить материал доступно как для биологов, так и для геологов.

Биоминерализация – это совокупность биохимических процессов, в результате которых организмы образуют твердые минеральные включения. Первостепенное значение имеют неорганические соединения железа, но только одно из них – магнетит – обладает ферримагнитными свойствами. В настоящее время образование магнетита в результате биоминерализации показано у организмов, принадлежащих к различным таксонам, и предполагается у многих других (часть IV). Весьма вероятно, что именно магнетит обусловливает чувствительность всех животных к геомагнитному полю, и в связи с этим особую важность приобретает изучение эволюционной истории этого минерала и биохимических механизмов его образования. Как отмечают Ловенстам и Киршвинк (гл. 1), наиболее интересные вопросы в этой области исследования еще не сформулированы, а число полученных ответов пока очень невелико.

При изучении магнетизма горных пород определяют, как магнитные свойства минералов зависят от их состава, размера кристаллических зерен и их формы. Развитие этой области шло параллельно с исследованиями истории магнитного поля Земли (палеомагнетизмом); оно заложило основы для понимания механизмов сохранения горными породами памяти о магнитных полях, существовавших в прошлом. Магнетиту как широко распространенному в горных породах минералу, придающему им магнитные свойства, посвящено очень много экспериментальных и теоретических исследований, значительно больше, чем какому-либо другому минералу; его свойства описаны Бенерджи и Московитцем в гл. 2. Эти ферримагнитные свойства отличают магнетит от других оксидов железа биогенной природы, поэтому при изучении опосредованной магнетитом магниторецепции им уделяется особое внимание. Например, электронно-микроскопические исследования показали, что только магниточувствительные бактерии образуют кристаллы

магнетита, размер которых колеблется от 0,05 до 0,1 мкм; эти размеры, как следует из работ по изучению магнетизма горных пород, соответствуют одиночному магнитному домену. В аналогичных исследованиях кристаллов магнетита, содержащихся в зубцах хитона (и необходимых ему скорее благодаря своей твердости, а не магнитным свойствам), были обнаружены частицы, размеры которых больше или меньше указанных. Эти наблюдения позволяют предположить, что границы узкого интервала, в котором колеблются размеры бактериального магнетита, поддерживаются естественным отбором на магнитотаксис и что бактерии нашли ответ на вопрос о размере одиночного магнитного домена магнетита задолго до исследователей магнетизма горных пород.

Геомагнетизм – это наука о магнитном поле Земли, его источнике, истории и проявлении в пределах биосферы. Теперь мы знаем, что геомагнитное поле не только позволяет магниточувствительным организмам ориентироваться по сторонам света, но и несет помимо этого разнообразную полезную информацию. Суточные и другие колебания магнитного поля содержат информацию о географической широте, времени года и суток, а локальные магнитные аномалии, особенно такие, как океанические магнитные аномалии, могут в принципе служить ориентирами на путях миграции животных. Наибольший интерес представляют, конечно, вопросы о том, на какие свойства магнитного поля в действительности реагируют организмы и каковы механизмы их чувствительности к нему.

Однако для начала надо выяснить, что представляет собой магнитное поле Земли, как оно измеряется и описывается и какие именно из его параметров могут регистрироваться организмами. Гл. 3, написанная Скайлсом, – это первая попытка сделать обзор имеющихся данных для биологической аудитории. Его давно ждут и он представляет интерес для всех исследователей, работающих в этой области.

Глава 1

БИОМИНЕРАЛИЗАЦИЯ ЖЕЛЕЗА: ГЕОБИОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Хайнц А. Ловенстам, Джозеф Л. Киршвинк[1]

1. Введение

За два последних десятилетия число минералов, для которых показано биогенное происхождение, выросло с десяти, известных в 1963 г. (Lowenstam, 1963), до сорока (Lowenstam, Weiner, 1983). Причем, поскольку частота открытий не падает, совершенно ясно, что гораздо больше подобных минералов еще предстоит выявить. Среди открытых минералов, кристаллическая структура которых была определена с помощью современных методов, обнаружено 10 железосодержащих, а именно оксиды, сульфаты, сульфиды и фосфаты железа. В табл. 1.1 приведен перечень этих минералов, а также данные о встречаемости этих минералов у представителей различных таксонов, механизмах их биоминерализации и известных к настоящему времени функциях. Некоторые из этих минералов широко распространены среди эукариотических и прокариотических организмов, а два из них – ферригидрит и магнетит – по-видимому, занимают по важности соответственно четвертое и пятое места среди продуктов биоминерализации современных организмов. Ферригидрит ($2,5\ Fe_2O_3 \cdot 4,5H_2O$) образует сердцевину (мицеллу) железозапасающего белка ферритина у самых различных животных, а родственные ему минералы оксидов трехвалентного железа образуют ферритиноподобные структуры у других эукариотических, а также некоторых прокариотических организмов (например, фитоферритин и бактериоферритин). Магнетит был впервые обнаружен у хитонов менее 25 лет назад, но тогда к его биогенному происхождению отнеслись весьма скептически. Однако, как следует из приведенных в этой книге данных, он скоро сможет конкурировать с ферригидритом за четвертое место по распространенности.

Широкое распространение минералов железа, отраженное в табл. 1.1, не удивительно, если вспомнить о той фундаментальной роли, которую

[1] *Heinz A. Lowenstam and Joseph L.* Kirschvink, Division of Geological and Planetary Scinces, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125.

Таблица 1.1. Минералы железа, образующиеся вследствие биохимических процессов

Минералы	Таксоны	Механизм минерализации	Локализация минерала (в типичном случае)	Источник данных
Оксиды				
Магнетит (Fe_3O_4)	Бактерии	Минерализация, опосредованная остовом	Внутриклеточные магнитосомы	Blakemore, 1975
	Простейшие (?)	Неизвестен	Неизвестна	Lins de Barros et al., 1981
	Моллюски	Минерализация, опосредованная остовом	Внеклеточно, в зубцах хитонов	Lowenstam, 1962a
	Членистоногие	Неизвестен	В брюшке медоносных пчел	Gould et al., 1978
	Хордовые	Минерализация, опосредованная остовом	В надрешетчатой кости тунца, в голове голубя	Walker et al. (гл. 20 данной книги), Walcott et al., 1979
Ферригидрит ($5Fe_2O_3 \cdot 9H_2O$)	Бактерии	То же	В бактериоферритиновых мицеллах	Stiefel, Watt, 1979, Yariv et al., 1981
	Грибы	»	В ферритиновых мицеллах	David, Easterbrook, 1971; Peat, Banbury, 1968
	Растения	»	В мицеллах фитоферритина	Hyde et al., 1963
	Животные	»	В ферритиновых мицеллах	Ford et al., 1984
Лепидокрокит (δ-FeOOH)	Губки	Биоиндуцированная минерализация	В спонгиновых гранулах	Towe, Rutzler, 1968
	Моллюски	Минерализация, опосредованная остовом	В зубцах хитонов	Lowenstam, 1967
Гетит (α-FeOOH)	»	То же	В зубцах блюдечек	Lowenstam, 1962b
Аморфные оксиды трехвалентного железа	Бактерии	Неизвестен	Непостоянная или неизвестная	Ehrlich, 1981
	Простейшие	»	В цементе фораминифер	Towe, 1967
	Кольчатые черви	Минерализация, опосредованная осто-	В цементе трубок полихет	Lowenstam, 1972
	Моллюски	Неизвестен	В желудочных пластинках брюхоногих	Lowenstam, 1968
Аморфный ильменит	Бактерии (?)	Биоиндуцированная минерализация	На поверхности кожи голотурий	Lowenstam (неопубликованные данные)
Сульфиды				
Пирит (FeS_2)	»	То же	Внеклеточная	Hallberg, 1978
Гидротроилит ($FeS \cdot nH_2O$)	»	»	»	Hallberg, 1978
Сульфаты				
Ярозит $KFe_3[(SO_4)_2(OH)_6]$	»	»	Внеклеточная, показана только в лабораторных условиях	Lazaroff et al., 1982
Фосфаты				
Аморфный гидрат фосфата трехвалентного железа	Кольчатые черви	Минерализация, опосредованная остовом	В грудных щитках видов *Sternaspis*	Lowenstam, 1972
	Моллюски	То же	В зубцах хитонов	Lowenstam, 1972
	Иглокожие	»	В кожных гранулах голотурий	Lowenstam, Rossman, 1975

железо играет в биологических процессах. В преимущественно окислительных условиях современной гидросферы транспорт железа, растворимого только в двухвалентном (закисном) состоянии, идет очень медленно. Поэтому у организмов в результате эволюции выработались различные механизмы накопления железа и, кроме того, образовались внутренние железозапасающие структуры, необходимые как для удовлетворения повседневных потребностей в железе, так и при чрезвычайных ситуациях, когда остро ощущается недостаток в железе, например при кровотечении. Изящные механизмы накопления и запасания внеклеточного железа выработали, в частности, бактерии. Они способны образовывать множество небольших железоспецифичных хелатирующих соединений, называемых сидерофорами. Бактерии некоторых видов образуют эти соединения в больших количествах и выделяют их в окружающую среду. После связывания сидерофорами атомов железа из внеклеточной жидкости бактерии поглощают эти молекулы вместе с захваченным таким способом железом (Nealson, 1984).

2. Особенности процессов минерализации железа в живых организмах

По современным представлениям существуют два различных механизма минерализации (Lowenstam, 1981). Согласно одному из них – «биоиндуцированной» минерализации, – минерал образуется вследствие взаимодействия конечных продуктов метаболизма с катионами окружающе жидкости. Второй механизм получил название минерализаци «опосредованной органическим остовом». В этом случае образован центров кристаллизации и последующая минерализация происходят пр участии ранее образовавшегося остова органической природы. Эти дв процесса могут рассматриваться как два крайних проявления, межд которыми лежит спектр механизмов, для которых характерна все ув личивающаяся степень контроля со стороны организма за свойства образующихся минералов, а также процессом их роста. В случае би индуцированных процессов, соответствующих тому краю спектра, д которого характерна наименьшая степень биологического контрол минеральные образования похожи на аналогичные структуры, обр зующиеся вследствие неорганических реакций. Кристаллические агр гаты лишены характерных особенностей и обычно содержат случайны образом ориентированные кристаллиты различного размера. На з вершающих стадиях формирования минералов отмечена тенденция менее жесткому контролю за процессами минерализации. При м нерализации, опосредованной органическим остовом, соответствующ другому краю спектра, минералы, как правило, отличаются специ фической кристаллической формой и слабо варьирующими размерам Поликристаллические тела характеризуются генетически контролиру емой морфологией, высокоупорядоченной ориентацией кристаллическ

осей и выраженной кристаллической структурой (Lowenstam, 1980, 1981; Weiner, Traub, 1980). Некоторые минералы, кристаллизующиеся в гидросфере в ходе минерализации, опосредованной остовом, не образуются в результате неорганических реакций. К ним относятся магнетит, флюорит, гипс и целестин (Lowenstam, Weiner, 1983). Для этих минералов характерно наличие неравновесных относительно окружающей среды химических структур (Lowenstam, 1981). В настоящее время наиболее полно об этом свидетельствуют содержание стронция и магния, а также изотопный состав углерода и кислорода в карбонатах [сводки данных приведены в работах (Milliman 1974; Dodd, Stanton, 1981)].

Биохимические и рентгеноструктурные исследования органического остова раковин моллюсков показали, что он образован внутренним компонентом, состоящим из белка (подобного фиброину шелка) и часто хитина (Weiner, Traub, 1980, 1981). Внутренний компонент с обеих сторон покрыт слоями вещества, обладающего кислотными свойствами. В соответствии с предложенной моделью кристаллизации этим поверхностным слоям отводится роль носителей центров кристаллизации; они же обеспечивают надлежащую ориентацию кристаллографических осей, а также, по необходимости, приостанавливают рост кристаллов. Внутренний компонент служит остовом для кислых белков, а также выполняет механические функции. В обзоре Вейнера и соавт. (Weiner et al., 1983) подробно рассматриваются структура и функции остова у моллюсков и других эукариотических организмов.

Реакции биоиндуцированной минерализации широко распространены у прокариотических организмов; они протекают как внутри, так и вне клетки. Среди эукариотических организмов продукты минерализации встречаются у некоторых водорослей, относящихся к протоктистам, у представителей многих таксонов растений, а также у различных представителей животного царства. Минералы образуются в межклетниках у многих водорослей и внутри клеток у растений и животных (Arnott, 1973; Borowitzka et al., 1974; Lowenstam, 1981). Отнесение минералов к образующимся вследствие биоиндуцированной минерализации в большинстве случаев обусловлено формой кристаллов, их размером и структурой агрегатов, о чем можно судить по опубликованным фотографиям.

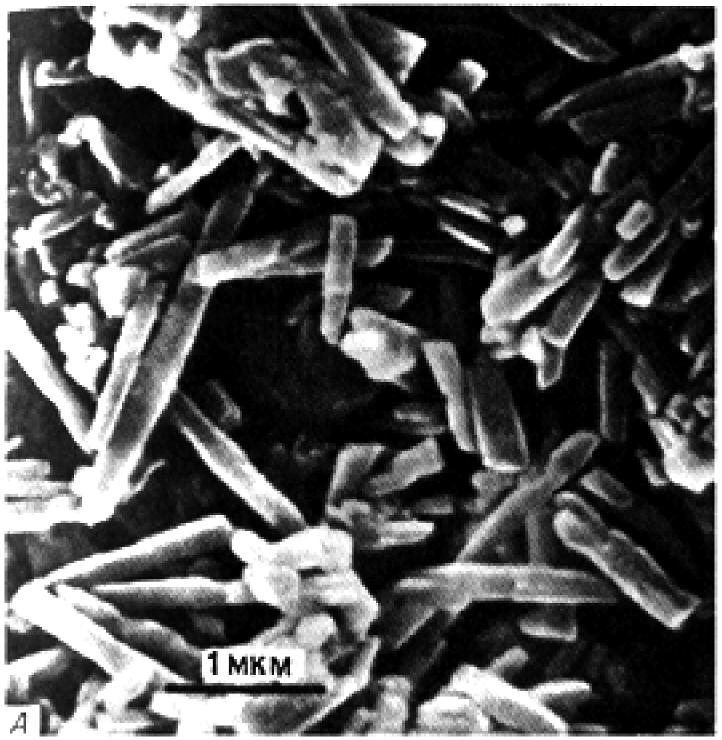
Минерализация, опосредованная органическим остовом, широко распространена у эукариотических организмов. Продукты минерализации, как правило, располагаются вне клетки, где они обычно образуют твердые минерализованные структуры, такие как экзо- и эндоскелеты; они могут также представлять собой множество отдельных минеральных зерен или (в случае точечной минерализации скелета) кристаллических агрегатов (Lowenstam, Margulis, 1980).

Известно сообщение об образовании бактериями минералов с характерной формой кристаллов, а в двух случаях – и с высокоупорядоченной кристаллической структурой. Это свидетельствует о том, что прокариотическим организмам также свойственны процессы минерализации, опосредованной остовом (Lowenstam, Weiner, 1983). Последнее

заключение подтверждают следующие наблюдения: магниточувствительные бактерии, обнаруженные Блейкмором, образуют внутри клеток покрытые оболочкой кристаллы магнетита в виде гексагональных призм или каплевидной формы (Blakemore, 1975; Towe, Moench, 1981; Matsuda et al., 1983; Blakemore et al., 1981). Размеры этих кристаллов варьируют в очень небольшой степени (Towe, Moench, 1981). Кроме того, было показано, что не имеющие пока видового названия бактерии рода *Leptotrix* образуют внутри покрывающей филаменты клеток оболочки гексагональную решетку из пока не идентифицированного минерала оксида трехвалентного железа (Caldwell, Caldwell, 1980). Характерная кристаллическая структура свидетельствует об опосредованном органическим остовом контроле за образованием этой решетки, но не известно, каким образом окружающая клетки оболочка выполняет роль органического остова. Другим примером могут служить два вида цианобактерий рода *Geitleria*. Поверхность их филаментов покрыта упорядоченными структурами из кристаллов кальцита, образующими квадратную решетку (Friedmann, 1955, 1979). После обработки кальцитовой оболочки разбавленной соляной кислотой остается только хрупкий пектиноподобный чехол (Friedmann, 1955; Lowenstam, Weiner, 1983). С помощью сканирующего электронного микроскопа получены фотографии предварительно обработанных ЭДТА (с целью удаления кальция) и высушенных до критической точки образцов свежесобранных клеток *Geitleria* (Lowenstam, 1984). На фотографиях видно, что квадратные участки, огороженные кристаллами кальцита, представляют собой органический остов; они связаны между собой и образуют непрерывную сеть, пронизывающую минерализованную оболочку бактерии.

Это наблюдение свидетельствует о том, что у прокариот минерализация, опосредованная органическим остовом, наблюдается не только у магниточувствительных бактерий, но и у цианобактерий, а также о том, что этот процесс может идти не только внутри клетки, но и на ее поверхности. У представителей рода *Geitleria* минерализованные структуры формируются на поверхности филаментов, образующей хорошо развитый остов, и внешне напоминают скелетные образования эукариотических клеток, однако они отличаются от последних упаковкой кристаллов.

Было также отмечено, что процессы биоиндуцированной и опосредованной остовом минерализации протекают в анатомически различных частях одного и того же организма, а иногда и в одном и том же месте (Lowenstam, Weiner, 1983). Примером второго из упомянутых случаев может служить верхняя челюсть моллюска наутилуса (*Nautilus*), для которой характерно чередование регулярных слоев кристаллов кальцита, формирующихся в результате минерализации, опосредованной остовом, и кристаллов брушита и веделита, образующихся вследствие биоиндуцированной минерализации (Lowenstam, Weiner, 1983).



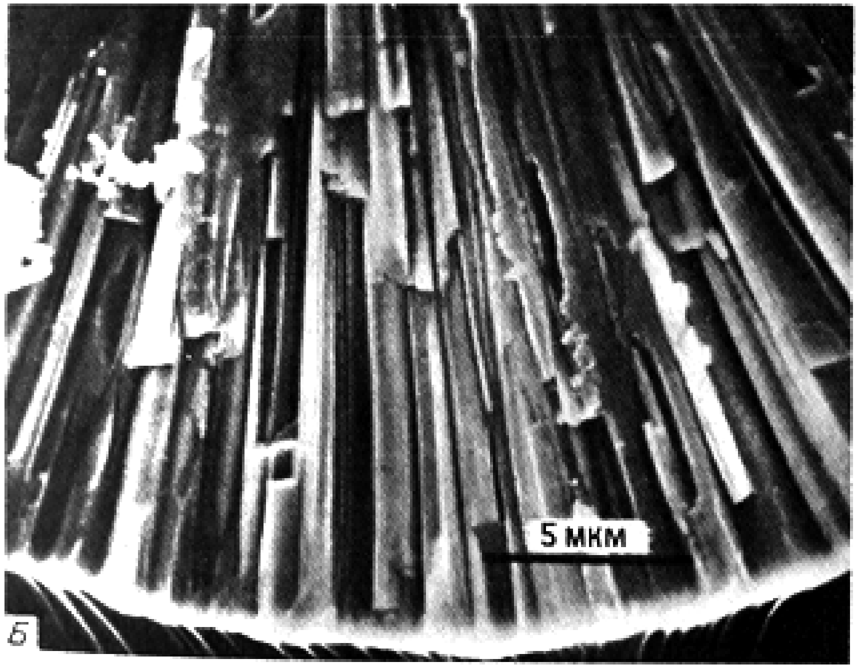


Рис. 1.1.4. Кристаллы флюорита из желудочных пластин брюхоногого моллюска рода *Enscaphander*. *Б*. Кристаллы флюорита в статолитах мизиды *Praunus flexuosus*.

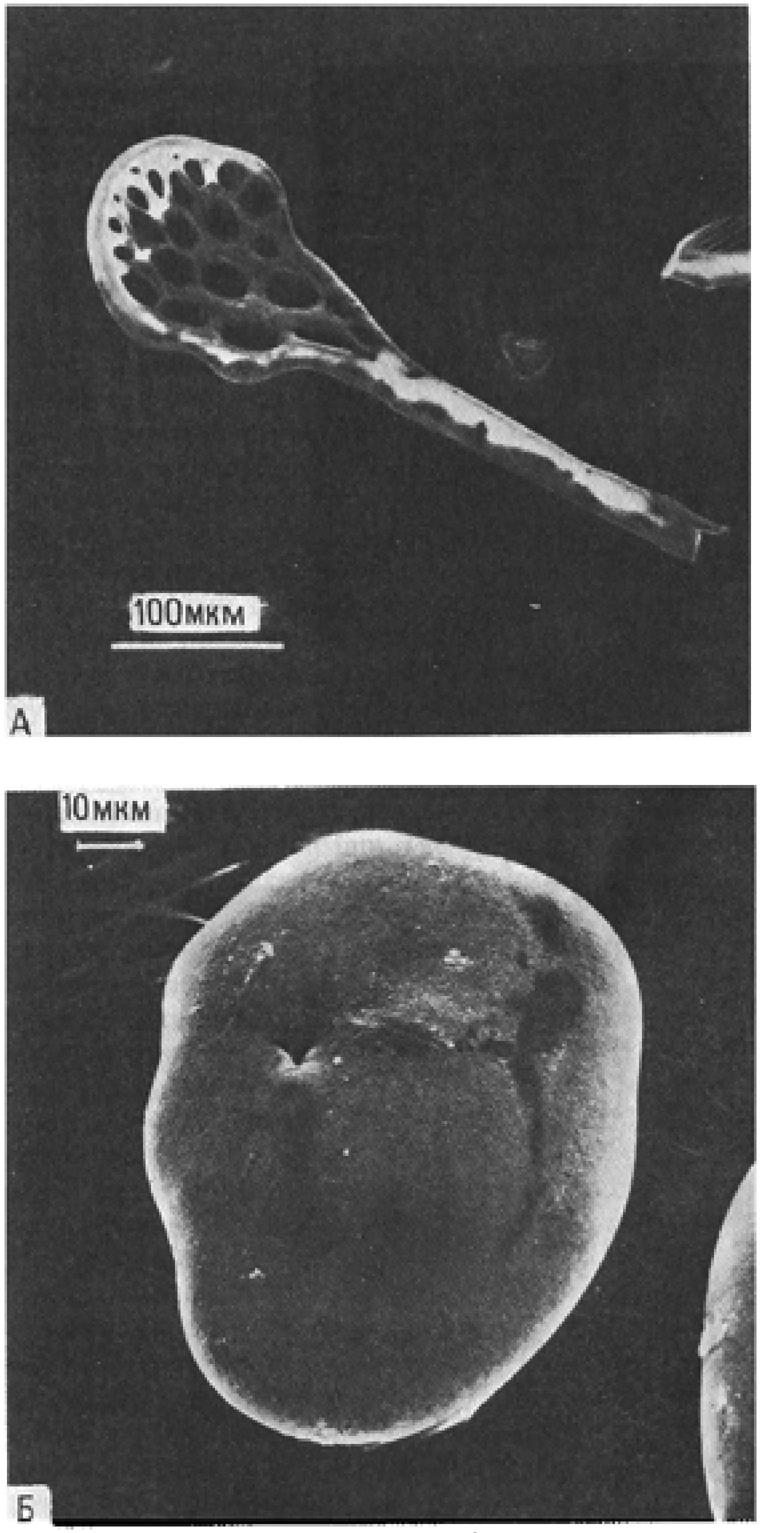


Рис. 1.2. *А*. Кальцитовая спикула из молодого организма *Molpadia intermedia*. *Б* Гранула, образованная аморфным гидратом фосфата трехвалентного железа в смеси с опалом, из взрослого организма *Molpadia intermedia*.

Часто кристаллы, образуемые организмами, имеют уникальную форму, и это позволяет делать вывод об их биогенном происхождении. Типичным примером служит флюорит (CaF_2), образующийся в желудочных пластинках брюхоногого моллюска из рода *Eoscaphander* (рис. 1.1, *А*) и в статолитах многих видов мизид (рис. 1.1, *Б*) (Lowenstam, McConnel, 1968). Игольчатые кристаллы этого минерала (рис. 1.1, *Б*) совсем не похожи на кристаллы кубической и октаэдрической формы, образующиеся при неорганических реакциях.

У животных различных групп отмечались изменения в характере минерализации в процессе онтогенеза. Наиболее выражены эти изменения у голотурий вида *Molpadia intermedia* (Lowenstam, Rossman, 1975). На послеличиночной стадии твердые части мезодермы у этих организмов состоят из кальцитовых игл (спикул), как и у других видов, относящихся к этому классу. По мере роста большая часть спикул, расположенных вне ротового и хвостового участков тела, рассасывается и затем замещается гранулами, образованными аморфным гидратом фосфата трехвалентного железа и аморфным кремниевым соединением, по составу соответствующим опалу. На рис. 1.2, *А* видны имеющие форму теннисной ракетки спикулы из молодых организмов, а на рис. 1.2, *Б* гранулы, образовавшиеся из продуктов минералогического замещения, у более взрослых организмов.

3. Биологические функции процессов биоминерализации железа

Железо играет ключевую роль во многих метаболических процессах, начиная от переноса кислорода гемоглобином в крови позвоночных животных и кончая центральной ролью в цитохромных структурах. Соответственно минералы железа служат для осуществления столь же широкого ряда функций, включающего перенос и запасание железа, удаление железосодержащих отходов жизнедеятельности, укрепление зубов и ориентацию на местности. Перенос и запасание железа представляют собой, по-видимому, основную функцию минерала ферригидрита, образующего, как отмечалось выше, сердцевинную мицеллу сохраняющего железо белка – ферритина. Механизм запасания железа необходим даже организмам, не имеющим в качестве переносчика кислорода гемоглобина. Например, хотя наутилусы и используют для переноса кислорода медьсодержащий белок гемоцианин, их ротовые мышцы содержат миоглобин и, следовательно, железо. Минералы железа служат также для укрепления поверхностного слоя зубцов, покрывающих радулу у хитонов и блюдечек. Животные этих двух групп, живущие в тропических и субтропических водах, используют свои минерализованные зубцы при питании обитающими в каменистом субстрате бактериями и водорослями. Как теперь принято считать, именно они вызывают сильное разрушение береговых утесов на

известняковых островах, которое дополняет разрушения, обусловленные процессами неорганической природы (Lowenstam, 1974). Расположенные вдоль радулы зубцы моллюсков постоянно изнашиваются и заменяются новыми; подобная потеря железа делает необходимым постоянный приток ферритина к местам формирования зубцов. И действительно, было показано, что концентрация ферритина в крови хитона высока (Nesson, 1969; Webb, Macey, 1983; гл. 16).

В организме человека минералы железа иногда образуются вследствие перегрузки метаболизма при лечении некоторых заболеваний. В частности, симптомы дефицита железа при гемахроматозе и талассемии снимаются инъекциями раствора легкоусваиваемого коллоидного железа. При этом анемия на короткий период уменьшается, а железо в конце концов накапливается в различных тканях (включая печень и селезенку) в виде частиц ферригидрита неправильной формы, называемых гемосидерином. Значительные запасы этого вещества можно без оперативного вмешательства быстро обнаружить путем измерения индуцированного магнитного момента сквид-магнитометрами (Ferrill, 1983).

Наконец, наиболее поразительную роль играют различные минералы железа в ориентации живых организмов; эта проблема обсуждается на протяжении всей книги. Так, была четко показана роль магнетита в ориентации клеток магниточувствительных бактерий (Blakemore, 1975; Frankel et al., 1979). С ним же может быть связан инстинкт поиска дома (хоминг) у хитонов (Lowenstam, 1962a; Mook, 1983). С развитием методов экстракции, позволяющих выделять из тканей очищенные препараты ферромагнитных минералов и с высоким разрешением исследовать их структуру и свойства (гл. 5), были получены свидетельства биогенного происхождения многих магнитных частиц, обнаруживаемых с помощью сквид-магнитометрии.

4. Геологические особенности оксидов и сульфидов железа биогенного происхождения

В настоящее время об эволюционной истории процессов биоминерализации железа известно очень немного. То, что у современных бактерий обнаружены разнообразные минералы железа биогенного происхождения (табл. 1.1), позволяет предположить, что способность к биоминерализации развилась до возникновения и распространения эукариотических организмов (т.е. по меньшей мере 1,4 млрд. лет назад). Использование отношения $^{34}S/^{32}S$ в качестве признака биоиндуцированной минерализации у сульфатредуцирующих бактерий из осадочных пиритов докембрия показало, что геохимический подход может оказать существенную пользу при изучении истории процессов минерализации. Судя по всему, первым возник механизм биоиндуцированной минерализации, и произошло это в докембрии. Это предположение базируется на данных об изотопном составе серы в осадочных пиритах, которые свидетельствуют о возникновении способности к селекции изотопов серы у сульфатредуцирующих бактерий из образцов с возрастом 2–2,4 млрд. лет (Cameron, 1982; Skyring, Donnely, 1982). Весьма вероятно, что одним из первых биохимических процессов, индуцирующих биоминерализацию оксида железа и приведших к образованию некоторых из наиболее древних полосчатых железорудных формаций (ПЖФ, Banded Iron Formations), было использование в качестве доноров электронов при фотосинтезе водорастворимых ионов двухвалентного железа (вместо H_2S или H_2O) (Nealson, 1984, Y. Cohen, личное сообщение). Это позволяет предположить, что железосодержащие белки существовали еще до возникновения давления отбора, вызванного увеличением концентрации свободного кислорода в атмосфере. Такое представление хорошо согласуется с тем, что у всех известных аэробов системы, регулирующие концентрацию кислорода в организме, образованы в основном железосодержащими белками. Естественно, железосодержащие белки должны были появиться до сильного изменения окислительно-восстановительного состояния океанов, приведшего к повсеместному образованию ПЖФ, возраст которых датируется двумя миллиардами лет. Недавние работы по исследованию ныне существующих магниточувствительных бактерий дают основания утверждать, что стадия образования магнетита в цепи биосинтетических реакций зависит от присутствия свободного кислорода (Bazylinski, Blakemore, 1983; Blakemore et al., 1985). Этот результат, если его распространить на все бактерии, способные образовывать магнетит, позволяет предположить, что возраст их ископаемых остатков не должен заметно превышать два миллиарда лет. Правда, надо отметить, что геомагнитное поле, по-видимому, сформировалось на ранних этапах образования Земли (Stevenson, 1983) и способность к магнитотаксису должна была давать селективное преимущество в эволюции и в отсутствие больших градиентов кислорода.

По современным данным, почти вплоть до конца протерозоя существовала только биоминерализация, индуцированная бактериями. Начиная с границы венда и раннего кембрия, эукариоты все в большей степени обретают способность контролировать процессы образования минералов, и возникает механизм минерализации, опосредованной органическим остовом. Насколько можно судить по скелетным отложениям, первыми эукариотами, у которых развился механизм минерализации, опосредованной органическим остовом, были животные. Однажды возникнув, этот способ минерализации начал с раннего кембрия стремительно распространяться среди самых различных групп животных в течение всего фанерозоя.

Ныне живущие как прокариотические, так и эукариотические организмы демонстрируют примеры минерализации, охватывающие весь спектр возможных механизмов,– от биоиндуцированной минерализации

до опосредованной органическим остовом (Lowenstam, Weiner, 1983). Это плохо согласуется со взглядами на историю биоминерализации, основанными на изучении палеонтологических данных. В соответствии с этими данными опосредованная остовом минерализация с самого начала была свойственна только эукариотическим организмам, и возникла она гораздо позже биоиндуцированной минерализации, которая в свою очередь была характерна только для прокариотических организмов. У современных организмов был проведен анализ ряда независимых результатов, относящихся к продуктам минерализации, опосредованной остовом. Он заставляет усомниться в справедливости сделанного на основе палеонтологических данных вывода о том, что минерализованные скелетные остатки, впервые появляющиеся в образцах, соответствующих границе венда и кембрия, действительно отражают момент возникновения механизма минерализации, опосредованной остовом. Неясно также, у животных ли впервые появился этот механизм (Lowenstam, Weiner, 1983; Lowenstam, 1984).

Трудно предположить, что минерализация, опосредованная остовом, уже в момент возникновения имела совершенный механизм и приводила к образованию у животных однородного и достаточно массивного скелета, обеспечивающего морфологическую целостность организмов. Ловенстам и Маргулис (Lowenstam, Margulis, 1980), исходя из того что многие ископаемые скелетные остатки, датируемые ранним кембрием, отличаются лишь слабой поверхностной минерализацией, предположили, что образованию массивных твердых структур предшествовала точечная минерализация. Данные о частичной минерализации скелета у мягкотелых медуз *Ediacara* из позднего венда и развитии спикул у пеннатулидоподобных форм (Glaessner, Daily, 1959; Glaessner, 1976) подтверждают предположение о том, что первоначально минерализации подвергались отдельные участки тела.

Аналогичная тенденция к усложнению организации продуктов минерализации гомологичных участков тела прослеживается у некоторых современных групп животных, например моллюсков и рыб (Lowenstam, 1980; Lowenstam, Weiner, 1983). Отражая направление эволюции, эти данные не только подтверждают постулат о том, что сплошной минерализации скелета у животных предшествует точечная минерализация, но дают также ясное представление о том, что этот процесс проходит через ряд последовательных стадий, перечисленных ниже. Для стадии 1 характерны единичные кристаллы или коллоидные тела, во множестве покрывающие участок, где идет минерализация. На стадии 2 минеральные отложения образованы множеством кристаллических агрегатов, а не отдельными кристаллами. На стадии 3 большая часть кристаллов включена в более крупные образования, но некоторое количество небольших кристаллических агрегатов еще остается. Для стадии 4 характерна агрегация всех кристаллов в единую структуру с однородными кристаллографическими и минералогическими характеристиками. Стадия 5 похожа на стадию 4 тем, что все кристаллы

включены в единую структуру, но отличается наличием микроархитектурных ячеек с различной кристаллической структурой, которые в принципе могут не иметь различий в минеральном составе. У некоторых организмов процесс останавливается на стадии 4, у других может отсутствовать та или иная стадия. Образующиеся на стадии 1 кристаллы, подобно другим продуктам минерализации, опосредованной остовом, часто отличаются характерной формой, могут иметь уникальный минеральный состав, а иногда – неравновесную относительно окружающей среды химическую структуру. Начиная с объединения отдельных кристаллов в сложные образования на стадии 2 и вплоть до включения всех кристаллов в единую структуру, образующуюся на стадиях 4 и 5, сохраняются упорядоченная кристаллическая структура и хорошо определенная, генетически контролируемая морфология поликристаллических тел. Следовательно, отдельные кристаллы, образующиеся на стадии 1, и небольшие кристаллические агрегаты, формирующиеся на стадиях 2 и 3, должны отличаться от кристаллов и кристаллических агрегатов биоиндуцированного и неорганического происхождения.

Совокупность представленных выше соображений служит весьма серьезным свидетельством того, что ко времени появления первых полностью минерализованных скелетов животных в ископаемых остатках механизм минерализации, опосредованной органическим остовом, не только уже существовал, но с эволюционной точки зрения почти достиг в своем развитии завершения, т. е. стадии 4, а возможно, и стадии 5. Таким образом, минерализация, опосредованная остовом, возникла существенно раньше – в протерозое; недостающими свидетельствами ранних стадий развития этого механизма могут оказаться отдельные кристаллы и небольшие кристаллические агрегаты из скальных осадочных пород, удовлетворяющие рассмотренным выше критериям. Из предположения о том, что ранние стадии эволюции минерализации, опосредованной остовом, проходили в протерозое, следует также, что впервые этот механизм мог возникнуть отнюдь не у представителей животного мира. Это противоречит современным взглядам, основанным на результатах исследования ископаемых остатков.

Независимым свидетельством возникновения минерализации, опосредованной остовом, в докембрии служит сравнение биохимической природы органических остовов эукариотических организмов, относящихся к различным типам и способных формировать минерализованные твердые части тела (Weiner et al., 1983). Были изучены животные, относящиеся к самым различным типам, и одна группа протоктист. Проведенное сравнение выявило общность биохимической структуры органических остовов у эукариотических организмов; это согласуется с предположением о том, что «технологию» минерализации, опосредованной остовом, все изученные организмы унаследовали от некоего общего предка, жившего в докембрии. Широко распространившаяся к концу докембрия способность использовать минерализацию, опосредо-

ванную остовом, для наращивания твердого внешнего скелета, представляет собой, по-видимому, кульминацию долгого эволюционного процесса, а не его начало. Альтернативная точка зрения, которая заключается в том, что организмы, относящиеся к различным типам, вырабатывали «стратегию» использования органического остова независимо, нуждается в обосновании. Для этого необходимо объяснить общность биохимических характеристик органических остовов у животных, относящихся к различным типам.

Как отмечалось выше, недавно было показано, что ныне существующие прокариотические организмы также образуют минералы с помощью органического остова. Например, магниточувствительные бактерии содержат кристаллы магнетита, отличающиеся характерной формой и слабо варьирующими размерами. Похожие кристаллы магнетита недавно были обнаружены в миоценовых отложениях (Kirschvink, 1982; Kirschvink, Chang, 1984; гл. 36), но геологические данные о возрасте этих бактерий, а также двух других групп бактерий, способных к образованию минералов, пока отсутствуют. Существенно, однако, что современные бактерии, образующие магнетит и оксид трехвалентного железа, возможно, еще сохранили память о восстановительной атмосфере и переходе от восстановительных к окислительным условиям, произошедшем в раннем докембрии. Представляет интерес и то, что третья группа минералообразующих бактерий относится к цианобактериям, остатки которых прослеживаются в отложениях, имеющих возраст до 3,5 млрд. лет (Awramik et al., 1983). Пока ничего не известно о биохимической природе органических остовов у прокариотических организмов и соответственно неясно, аналогичны ли они органическим остовам эукариотических организмов. Очевидно, необходимо это выяснить и вести поиски в докембрийских отложениях следов прокариотических организмов, способных к минерализации, опосредованной остовом. Это требуется для того, чтобы можно было решить, развился ли механизм минерализации, опосредованной органическим остовом, порознь у прокариотических и эукариотических организмов, или эукариоты унаследовали «технологию» этого процесса у жившего в докембрии прокариотического предшественника.

Интересно отметить, что «передача по наследству» «технологии» минерализации, опосредованной остовом, от прокариотических к эукариотическим организмам хорошо согласуется с эволюционной схемой, предложенной Маргулис (Margulis, 1981), согласно которой эукариоты произошли непосредственно от прокариотических организмов, в то время как в рамках эволюционной схемы Войзе (Woese, 1981) происхождение «технологии» минерализации четко не прослеживается.

Примечание

Данная работа представляет собой отчет № 4150 Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology.

Литература

Arnott H. J., 1973. Plant calcification. In: Biological Mineralization (I. Zipkin, ed.), Wiley, New York, pp. 609–627.

Awramik S. M., Schopf J. A., Walter M. R. (1983). Filamentous fossil bacteria from the Archean of Western Australia, Precambrian Res., 20, 357–374.

Bazylinski D. A., Blakemore R. P. (1983). Denitrification and assimilatory nitrate reduction in *Aquaspirillum magnetotacticum*, Appl. Environ. Microbiol., 46, 1118–1124.

Blakemore R. P. (1975). Magnetotactic bacteria, Science, 190, 377–379.

Blakemore R. P., Frankel R. B., Kalmijn A. J. (1981). South-seeking magnetotactic bacteria in the southern hemisphere, Nature, 286, 384–385.

Blakemore R. P., Short K. A., Bazylinski D. A., Rosenblatt C., Frankel R. B. (1985). Microaerobic conditions are required for magnetite formation with *Aquaspirillum magnetotacticum*, Geomicrobiol. J., 4, 53–71.

Borowitzka M. A., Larkum A. W. D., Nockolds C. E. (1974). A scanning electron microscope study of the structure and orgahization of the calcium carbonate deposits of algae, Phycologia, 13, 195–203.

Caldwell D. E., Caldwell S. J. (1980). Fine structure of in situ microbial iron deposits, Geomicrobiol. J., 2, 39–53.

Cameron E. M. (1982). Sulphate and sulfite reduction in early Precambrian oceans, Nature, 296, 145–148.

David C. N., Easterbrook K. (1971). Ferritin in the fungus *Phycomices*, J. Cell Biol., 48, 15–28.

Dodd J. R., Stanton R. J.; 1981. Paleoecology: Concepts and Applications, Wiley, New York, pp. 138–142.

Ehrlich H. L., 1981. Geomicrobiology, Dekker, New York, pp. 164–201.

Ferrill D. E. (1983). Assessment of iron in human tissue: The magnetic biopsy. In: Biomagnetism: An Interdislipinary Approach (S. J. Williamson, G. L. Romani, L. Kaufman, and Ivo Modena, eds.), Plenum Press, New York, pp. 483–500.

Ford G. C., Harrison P. M., Rice D. W., Smith J. M. A., Treffry A., White J. L., Yariv J. (1984). Ferritin: Design and formation of an iron storage molecule, Philos. Trans. R. Soc., London, Ser. B. 304, 551–565.

Frankel R. B., Blakemore R. P., Wolfe R. S. (1979). Magnetite in freshwater magnetotactic bacteria, Science, 203, 1355–1357.

Friedmann I. (1955). *Geitleria calcarea* n. gen. et n. sp.: A new atmophylic lime-encrusting blue-green algae, Bot. Not. Lund., 108, 439–445.

Friedmann I. (1979). The genus *Geitleria* (Cyanophyceae or Cyanobacteria): Distribution of *G. calcarea* and *G. floridana* n. sp., Pl. Syst. Evol., 131, 169–178.

Glaessner M. F. (1976). Early Phanerozoic annelid worms and their geological and biological significance, J. Geol. Soc. London, 132, 259–275.

Glaessner M. F., Daily B. (1959). The geology and late Precambrian fauna of the Ediacara fossil reserve, Rec. South Aust. Mus. (Adelaide), 13, 369–401.

Gould J. L., Kirschvink J. L., Deffeyes K. S. (1978). Bees have magnetic remanence, Science, 202, 1026–1028.

Hallberg R. O., 1978. Metal-organic interaction at the redoxcline. In: Environmental Biogeochemistry and Geomicrobiology, Vol. 3 (W. E. Krumbein, ed.), Ann. Arbor Science Publischers, Ann. Arbor, Mich., pp. 947–953.

Hyde B. B., Hodge A. J., Kahn A., Birnstiel M. L. (1963). Studies on phytoferritin. 1. Identification and localization, J. Ultrastruct. Res., 9, 248–258.

Kirschvink J. L. (1982). Paleomagnetic evidence for fossil biogenic magnetite in western Crete, Earth Planet. Sci. Lett., 59, 388–392.

Kirschvink J. L., Chang S.-B. R. (1984). Ultrafine-grained magnetite in deep-sea sediments: Possible bacterial magnetofossils, Geology, 12, 559–562.

Lazaroff N., Sigal W., Wasserman A. (1982). Iron oxidation and precipitation of ferric hydroxysulfates by resting *Thiobacillus ferroxidans* cells, Appl. Environ. Microbiol., 43, 924–938.

Lins de Barros H. G. P., Esquivel D. M. S., Danon J., Oliveira J. P. H. (1981). Magnetotactic algae, Acad. Bras. Cienc. Notas. Fis. CBPFNF–048/81.

Lowenstam H. A. (1962a). Magnetite in denticle capping in recent chitons (Polyplacophora), Bull. Geol. Soc. Am., **73**, 435–438.

Lowenstam H. A. (1962b). Goethite in radular teeth of recent marine gastropods, Science, **137**, 279–280.

Lowenstam H. A., 1963. Biologic problems relating to the composition and diagenesis of sediments. In: The Earth Sciences: Problems and Progress in Current Research (T. W. Donnelly, ed.), University of Chicago, pp. 137–195.

Lowenstam H. A. (1967). Lepidocrocite, an apatite mineral, and magnetite in teeth of chitons (Polyplacophora), Science, **156**, 1373–1375.

Lowenstam H. A. (1968). Weddellite in a marine gastropod and in antarctic sediments, Science, **162**, 1129–1130.

Lowenstam H. A. (1972). Phosphate hard tissue of marine invertebrates: Their nature and mechanical function, and some fossil implications, Chem. Geol., **9**, 153–166.

Lowenstam H. A. (1974). Impact of life on chemical and physical processes. In: The Sea, Vol. 5 (E. D. Goldberg, ed.), Wiley, New York, pp. 715–796.

Lowenstam H. A., 1980. Bioinorganic constituents of hard parts. In: Biogeochemistry of Amino Acids (P. E. Hare, T. D. Hoering, and K. King, Jr., eds.), Wiley, New York, pp. 3–16.

Lowenstam H. A. (1981). Minerals formed by organisms, Science, **211**, 1126–1131.

Lowenstam H. A., 1984. Biomineralization processes and products and the evolution of biomineralization, 27th Int. Geol. Congr. Sect. Paleontol. Theme, C.02.1.5.

Lowenstam H. A., McConnell D. (1968). Biologic precipitation of fluorite, Science, **162**, 1496–1498.

Lowenstam H. A., Margulis L. (1980). Evolutionary prerequisites for early Phanerozoic calcareous skeletons, BioSystems, **12**, 27–41.

Lowenstam H. A., Rossman G. R. (1975). Amorphous, hydrous, ferric phosphatic dermal granules in *Molpadia* (Holothuroidea): Physical and chemical characterization, and ecologic implication of the bioinorganic fraction, Chem. Geol., **15**, 15–51.

Lowenstam H. A., Weiner S., 1983. Mineralization by organisms, and the evolution of biomineralization. In: Biomineralization and Biological Metal Accumulation (P. Westbroek and E. W. de Jong, eds.), Reidel, Dordrecht, pp. 191–203.

Margulis L., 1981. Symbiosis in Cell Evolution, Freeman, San Francisco.

Matsuda T., Endo J., Osakabe N., Tonomura A., Arii T. (1983). Morphology and structure of biogenic magnetite particles, Nature, **302**, 411–412.

Milliman J. D., 1974. Marine Carbonates, Springer-Verlag, Berlin, pp. 52–147.

Mook D. (1983). Homing the West Indian chiton *Ancanthopleura granulata* Gmelin, 1791, Veliger, **26**, 101–105.

Nealson K. H., 1984. The microbial iron cycle. In: Microbial Geochemistry (W. E. Krumbein, ed.), Blackwell, Oxford, pp. 159–190.

Nesson M. H., 1969. Studies on radulae tooth mineralization in the Polyplacophora, Ph. D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena.

Peat A., Banbury G. H. (1968). Occurrence of ferritin-like particles in a fungus, Planta, **79**, 268–270.

Skyring G. W., Donnelly T. H. (1982). Precambrian sulfur isotopes and a possible role for sulfite in the evolution of biological sulfate reduction, Precambrian Res., **17**, 41–61.

Stevenson D. J., 1983. The nature of the earth prior to the oldest known rock record: The hadean earth. In: Earth's Earliest Biosphere (J. W. Schopf, ed.), Princeton University Press, Princeton N. J., pp. 32–40.

Stiefel E. I., Watt G. D. (1979). *Azotobacter* cytochrome 6557.5 is a bacterioferritin, Nature, **279**, 81–83.

Thode H. G., Kleerekoper H., McElcheran O. (1951). Isotopic fractionation in the bacterial reduction of sulphate, Research, **4**, 581–582.

Towe K. M., 1967. Wall stucture and cementation in *Haplophragmoides canariensis*, Contributions from the Cushman Foundation for Foraminiferal Research, Vol. XVIII, Part 4.

Towe K. M., Moench T. T., 1981. Electron-optical characterization of bacterial magnetite, Earth Planet. Sci. Lett., **52**, 213–220.

Towe K. M., Rutzler K. (1968). Lepidocrocite iron mineralization in keratose sponge granules, Science, **162**, 268–269.

Walcott C., Gould J. L., Kirschvink J. L. (1979). Pigeons have magnets, Science, **205**, 1027–1029.

Webb J., Macey D. C., 1983. Plasma ferritin in *Polyplacophora* and its possible role in the biomineralization of iron. In: Biomineralization and Biological Metal Accumulation (P. Westbroek and E. W. de Jong, eds.), Reidel Dordrecht, pp. 423–428.

Weiner S., Traub W. (1980). X-ray diffraction study of the insoluble organic matrix of mollusk shells, FEBS Lett., **111**, 312–316.

Weiner S., Traub W., 1981. Organic-matrix-mineral relationships in mollusk shell nacreous layers. In: Structural Aspects of Recognition and Assembly in Biological Macromolecules (M. Balaban, J. L. Sussman, W. Traub, and A. Yonath, eds.), Balaban ISS, Rehovot, pp. 467–482.

Weiner S., Traub W., Lowenstam H. A., 1983. Organic matrix in calcified exoskeletons. In: Biomineralization and Biological Metal Accumulation (P. Westbroek and E. W. de Jong, eds.), Reidel, Dordrecht, pp. 205–224.

Woese C. R. (1981). Archaebacteria, Sci. Am., **244**, 98–122.

Yariv J., Kalb A. J., Sperling R., Bauminger E. R., Cohen S. G., Offer S. (1981). The composition and the structure of bacterial ferritin of *Escherichia coli*, Biochem. J., **197**, 171.

Глава 2

ФЕРРИМАГНЕТИЗМ МАГНЕТИТА

Субир К. Банерджи, Брюс М. Московиц[1]

1. Введение

Самым распространенным материалом магнитных включений в биологических системах является магнетит Fe_3O_4, хотя встречаются и его разновидности: с недостатком катионов – маггемит (γ-Fe_2O_3) и замещенная форма – титаномагнетит. В этой главе мы опишем природу магнетизма (точнее, ферримагнетизма) магнетита и в первую очередь – его монокристаллов. Затем, основываясь на теории магнитных доменов, перейдем к исследованию свойств магнетита, зависящих от размеров частиц в образце, и различных вкладов в остаточную намагниченность. При этом мы не будем останавливаться только на седиментационной остаточной намагниченности (depositional remanent magnetization, DRM), поскольку лишь в очень ограниченном числе случаев убедительно доказано, что она обязана своим происхождением биогенному магнетиту. Наконец, мы обсудим некоторые магнитные методы определения доменного состояния и, следовательно, размеров частиц в образцах, содержащих магнетит.

2. Основные понятия

2.1. Структура шпинели

В структуре шпинели кристаллизуются очень многие оксидные минералы, в том числе и магнетит. Эта структура может включать катионы более 30 элементов в валентных состояниях от + 1 до + 6. Часто такие катионные примеси существенно влияют на физические и, в частности, на магнитные свойства шпинелей.

---

[1] *Subir K. Banerjee*, Department of Geology and Geophysics, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota 55455. Contribution No. 1059 of the School of Earth Sciences, Department of Geology and Geophysics, University of Minnesota. Minneapolis. *Bruce M. Moskowitz*, Department of Geological and Geophysical Sciences, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544.

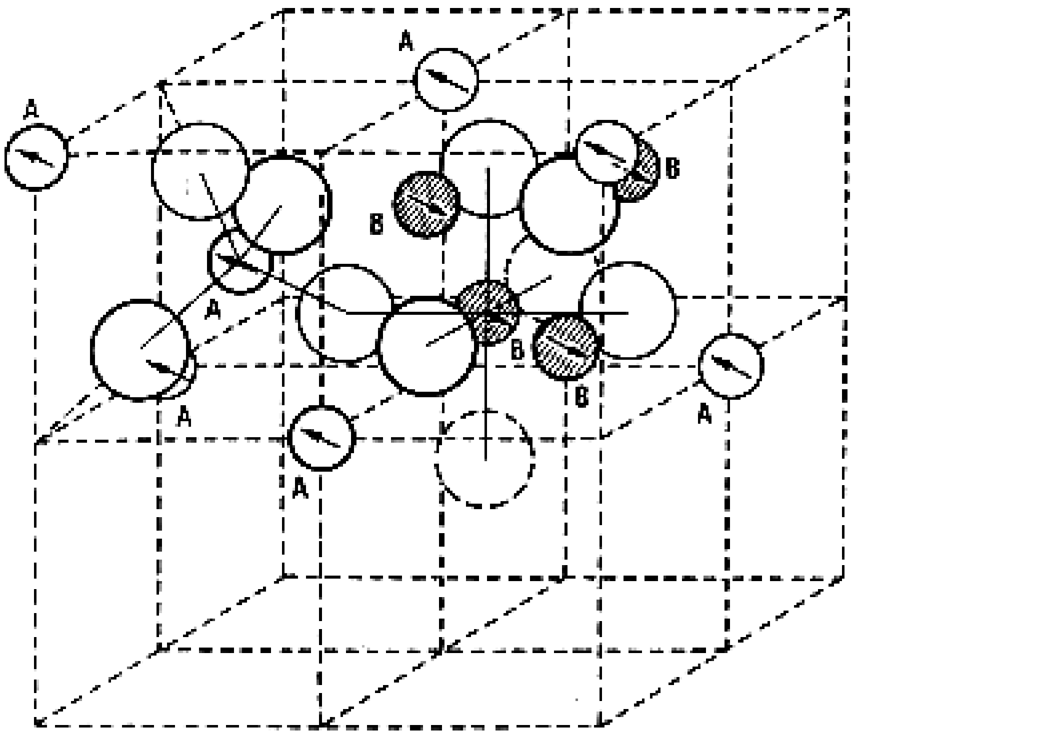


Рис. 2.1. Элементарная ячейка шпинели, в двух из восьми октантов которой показано расположение ионов (Gorter, 1955). Шесть остальных октантов подобны этим двум, причем октанты, имеющие общее ребро, обладают одинаковыми структурами, а имеющие общую грань – разными. Ионы металлов могут находиться в позициях А и В, окруженных четырьмя и шестью ионами кислорода (большие круги) соответственно. Ионы кислорода находятся на расстоянии примерно четверти пространственных диагоналей октантов от их вершины. Небольшие смещения ионов кислорода из этих положений влияют на состояния ионов в позициях А и В. Стрелками показаны магнитные моменты в этих позициях, направленные навстречу друг другу (см. текст).

Элементарная ячейка шпинели (рис. 2.1) представляет собой гранецентрированный куб и относится к пространственной группе *Fd3m*[1]. В элементарной ячейке шпинельных оксидов 32 атома кислорода образуют как бы остов, в пустотах которого располагаются катионы. Существуют два типа таких позиций: тетраэдрические, или А-позиции,– в центрах тетраэдров, в вершинах которых находятся ионы кислорода, и октаэдрические, или В-позиции,– в центрах октаэдров, образованных, как и тетраэдры, кислородными ионами.

Положение ионов кислорода описывается параметром *u*, отличие которого от значения 0,25 соответствует смещению ионов кислорода вдоль осей [111] из позиций идеальной кубической плотноупакованной шпинельной структуры.

---

[1] Более подробно кристаллография шпинелей описана в книге Крупичка С. Физика ферритов, т.1. М.: Мир, 1976.– *Прим. перев.*

В элементарной ячейке шпинельного оксида имеется 64 позиции типа A и 32 позиции типа B, однако только 8 и 16 из них действительно заполняются катионами. Общую формулу такого оксида записывают в виде XY_2O_4, где X и Y – катионы разных валентностей. В нормальной шпинели 8 X-катионов занимают позиции типа A, а 16 Y-катионов – позиции типа B. В обращенной шпинели 8 Y-катионов занимают A-позиции, а 8 X- и 8 Y-катионов – B-позиции. Нормальная и обращенная структуры обозначаются соответственно $X[Y_2]O_4$ и $Y[XY]O_4$. Существуют шпинели и с промежуточным распределением катионов.

2.2. Магнетит

Магнетит, как следует из нейтронографических данных (Shull et al., 1951), представляет собой обращенную шпинель с формулой $Fe^{3+}[Fe^{2+}Fe^{3+}]O_4$. Постоянная решетки, по данным рентгенографии, полученным на природных и синтетических образцах, лежит в интервале от 8,393 до 8,396 Å и зависит от содержания катионных вакансий и примесей (Lindsley, 1976). Согласно результатам нейтронографических исследований (Hamilton, 1958), $u = 0{,}2548 \pm 0{,}0002$ (при 23°С), что свидетельствует о почти идеальной кубической плотной упаковке ионов кислорода. Физические свойства магнетита описаны в табл. 2.1.

Магнитные моменты ионов железа, находящихся в A- и B-позициях, направлены навстречу друг другу и вдоль оси [111] (рис. 2.1). Антипараллельность моментов объясняется обменными взаимодействиями 3*d*-электронов ионов железа, обусловленными перекрыванием их волновых функций с волновыми функциями 2*p*-электронов, принадлежащих ионам кислорода. Величина и характер этих взаимодействий зависят от расстояния между ионами железа и кислорода и от валентных углов Fe—O—Fe, которые в свою очередь определяются положением ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} в структуре шпинели. В магнетите абсолютные значения обменных взаимодействий удовлетворяют неравенствам $AB_{126} \gg BB_{90} > AA_{79} \gg AB_{154} > BB_{125}$; здесь индексы указывают значения валентных углов Fe—O—Fe. При этом взаимодействия AB_{126} и BB_{90} отрицательны, т.е. способствуют антипараллельной направленности магнитных моментов соответствующих ионов; взаимодействие AA_{79} положительно и ведет к копараллельному упорядочению; взаимодействия AB_{154} и BB_{125} пренебрежимо малы. Такие соотношения между обменными взаимодействиями приводят к упорядочению магнитных моментов ионов железа в магнетите, характерному для ферримагнетиков. Обменное взаимодействие, преобладающее в магнетите (и вообще в ферритах) (Goodenough, 1963), называют *суперобменным*, указывая на важную роль, которую играют в нем ионы кислорода. Различают также прямой обмен, осуществляющийся без участия промежуточных ионов, однако для магнетита этот тип обмена несуществен из-за слишком больших расстояний между ионами железа.

При температуре 118 K магнетит переходит из кубической моди-

Таблица 2.1. Физические свойства магнетита [1]

Кристаллографическая система	
$T > 118$ K	Кубическая (обращенная шпинель)
$T < 118$ K	Орторомбическая
Постоянная решетки	8,393–8,3963 Å
Параметр *u*	0,2548
Плотность по рентгеновским данным	5,238 г/см³
Удельное электрическое сопротивление при 300 K	$7 \cdot 10^{-3}$ Ом·см
Температура Кюри	574°С [2]
Температура структурного фазового перехода	119 K
Намагниченность насыщения (удельный магнитный момент) при 300 K	471 Гс (90 Гс·см³/г) [3]
Атомный магнитный момент при 0 K	$4{,}1\mu_B$
Коэффициенты магнито-кристаллической анизотропии	$K_1 = -1{,}35 \cdot 10^5$ эрг/см³ $K_2 = -0{,}44 \cdot 10^5$ эрг/см³
Коэффициенты магнитострикции	$\lambda_s = 35 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_{111} = 72{,}6 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_{100} = -19{,}5 \cdot 10^{-6}$ $\lambda_{110} = 55{,}1 \cdot 10^{-6}$

[1] По данным работ, на которые есть ссылки в тексте, и по данным справочника Landolt-Boernstein, Series III/4b, pp. 65–66.

[2] По данным работы Pauthenet, 1950. В литературе приводятся значения от 575 до 585°С.

[3] Приведенные в разных работах значения удельного магнитного момента лежат в диапазоне от 82 до 93 Гс·см³/г. В работе Bate, 1980 обсуждаются причины разброса значений намагниченности и температуры Кюри.

фикации в орторомбическую. Ось *c* орторомбической элементарной ячейки параллельна ребру кубической, а соответствующая постоянная решетки на 0,03% меньше длины ребра куба (Bickford, 1953). Такой переход сопровождается упорядочением распределения ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} по B-позициям, вдоль осей типа ⟨110⟩ в плоскостях (100), приводящим к увеличению примерно в 100 раз (см., например, Parker, 1975) удельного электрического сопротивления магнетита, которое при 300 K равно $7 \cdot 10^{-3}$ Ом·см и определяется прыжковой проводимостью (Verwey, Haayman, 1941).

Со структурным фазовым переходом при температуре 118 K связана температура магнитной изотропии, в которой коэффициент магнитокристаллической анизотропии K_1 меняет знак, обращаясь в нуль в самой этой точке. При $T > 118$ K перескоки электронов между ионами железа разной валентности в B-позициях приводят к усредненному по времени валентному состоянию $Fe^{+2,5}$ и к соответствующему уменьшению большого вклада в анизотропию состояния Fe^{2+}. При $T < 118$ K прыжковая проводимость сильно уменьшается, а коэффициент анизотропии K_1 соответственно возрастает до больших положительных величин (Stacey, Banerjee, 1974). Это явление обсуждается ниже.

Природные магнетиты всегда содержат катионные примеси, из ко-

торых чаще всего встречаются Ti, Al, Mg и Mn. С ульвошпинелью $Fe^{2+}[Fe^{2+}Ti^{4+}]O_4$ магнетит образует твердые растворы – титаномагнетиты $Fe_{(3-x)}Ti_xO_4$, наиболее распространенные в базальтах магнитные минералы (см., например, Lindsley, 1976). Замещение железа титаном происходит посредством замены $2Fe^{3+}$ на $Ti^{4+} + Fe^{2+}$ с сохранением заряда, при этом ионы Ti^{4+} занимают позиции типа B (Ishikawa et al., 1964). Магнитные и другие физические свойства титаномагнетитов монотонно изменяются при увеличении содержания титана: намагниченность насыщения J_s и температура Кюри T_c уменьшаются, а коэрцитивная сила H_c, коэффициент магнитокристаллической анизотропии K_1, постоянная решетки a и электрическое сопротивление увеличиваются. Температура магнитной изотропии T_m в окрестности состава с $x = 0,3$ возрастает с ростом x (см., например, Stacey, Banerjee, 1974). Биогенный магнетит также иногда содержит примеси титана (Towe, Moench, 1981).

Другим близким магнетиту магнитным минералом является маггемит γ-Fe_2O_3, представляющий собой катион-дефицитную форму шпинели, образующуюся либо при низкотемпературном окислении магнетита, либо при дегидратации лепидокрокита (γ-FeOOH), либо в процессе прямого осаждения из раствора (Taylor, Schwertmann, 1974). Первый из этих процессов приводит к небольшому уменьшению постоянной решетки до 8,33 Å и к образованию катионных вакансий при окислении Fe^{2+} до Fe^{3+} (см., например, Lindsley, 1976). Маггемит термодинамически стабилен и превращается в гематит при нагревании до температур, превышающих 350°C. Магнетит и маггемит обычно различают, проводя мёссбауэровские и магнитные измерения, поскольку с помощью рентгеновского анализа сделать это достаточно сложно. Высказывались предположения (Frankel et al., 1979; Towe, Moench, 1981), что маггемит может содержаться в бактериях, проявляющих магнитотаксис.

3. Основные магнитные свойства

3.1. Намагниченность насыщения

Намагниченность насыщения представляет собой одну из основных характеристик ферримагнитных минералов, каковым является и магнетит. Ее можно было бы измерить непосредственно датчиком, помещенным внутрь однородно намагниченной однодоменной частицы. Однако на практике намагниченность насыщения определяют по зависимости намагниченности от внешнего магнитного поля, получаемой, например, с помощью вибрационного магнитометра, снабженного электромагнитом. Когда намагниченность перестает расти с ростом поля, это означает, что достигнуты максимально возможное при данной температуре упорядочение и соответственно намагниченность насыщения. Эта характеристика ферримагнетика не зависит от размеров частиц

в образце, однако, как и другие термодинамические параметры (например, коэффициенты магнитокристаллической и магнитострикционной анизотропии), она является функцией давления и температуры. Поэтому, приводя значения намагниченности насыщения, необходимо указывать давление и температуру, при которых проводились измерения.

В согласии с теорией ферримагнетизма, разработанной Неелем, намагниченность насыщения J_s магнетита достигает максимального значения при 0 K, и соответствующий удельный магнитный момент составляет примерно 90 Гс·см³/г. Температурная зависимость намагниченности насыщения магнетита (Pauthenet, 1950), приведенная на рис. 2.2, следует функции Бриллюэна, описывающей в квантовой механике эту зависимость (см., например, Cullity, 1972). Намагниченность J_s обращается в нуль при температуре Кюри T_C, когда тепловая энергия kT_C (k – постоянная Больцмана) становится равной энергии обменного взаимодействия. Температура Кюри, как и намагниченность насыщения, является, так сказать, «внутренней» характеристикой материала ферримагнетика. По данным разных авторов, T_C магнетита лежит в интервале от 574 до 585°C. Определяют температуру Кюри просто по температурной зависимости J_s, хотя для достижения состояния магнитного насыщения требуется поместить образец в сравнительно сильное магнитное поле ~ 10^4 Э, что из-за существования не исчезающего в точке T_C парамагнитного вклада в намагниченность затрудняет интерпретацию результатов измерений. Методы определения T_C сопоставлены в работе Moskowitz, 1981.

Нужно заметить, что, хотя ферримагнетизм магнетита хорошо описывается теорией Нееля, экспериментально полученное при $T = 4,2$ K значение J_s, выраженное в магнетонах Бора, приходящихся на формульную единицу вещества (Fe_3O_4), и равное $4,1\,\mu_B$, отличается от предсказываемой теорией величины $4,0\,\mu_B$. Этот факт, вероятно, объяс-

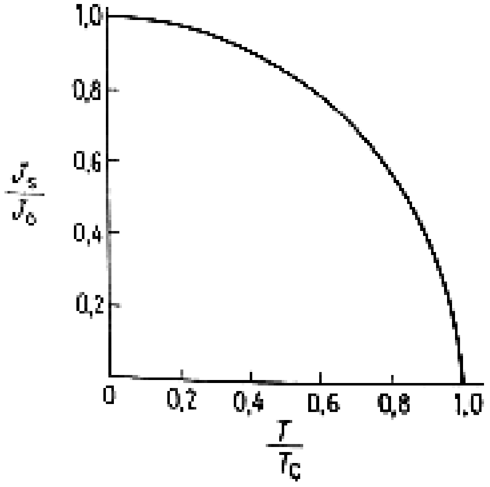


Рис. 2.2. Зависимость намагниченности насыщения, нормированной на ее значение при 0 K, $J_0 = 98,5$ Гс·см³/г, от температуры, выраженной в единицах температуры Кюри $T_c = 847$ K (Pauthenet, 1950).

няется дополнительным вкладом ионов Fe^{2+}, находящихся в октаэдрических положениях.

3.2. Анизотропия и магнитострикция

Если намагниченность насыщения можно считать «первичным» свойством магнетика, то магнитокристаллическая анизотропия – в некотором смысле «вторичное» свойство. Коэффициенты анизотропии характеризуют энергию, необходимую для поворота магнитного момента кристалла от «легкого» направления, вдоль которого энергия намагничивания минимальна, к «трудному», требующему наибольшей энергии. Наличие анизотропии обязано спин-орбитальному взаимодействию между спиновыми моментами атомов и кристаллической решеткой. Направления легкого и трудного намагничивания, вообще говоря, неодинаковы в разных магнитных минералах. В магнетите эти направления совпадают соответственно с осями [111] и [100] кубической элементарной ячейки, а промежуточное направление – с осью [110]. Зависимость энергии намагничивания поля для кристалла магнетита, как и для других кубических кристаллов, дается формулой

$$E_a = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_1^2\alpha_3^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2,$$

где K_1 и K_2 – коэффициенты анизотропии первого и второго порядков, а α_1, α_2 и α_3 – направляющие косинусы вектора внешнего магнитного поля, т.е. направления намагничивания. При 300 К коэффициенты K_1 и K_2 для магнетита равны $-1{,}35\cdot10^5$ и $-0{,}44\cdot10^5$ эрг/см^3 соответственно. В размагниченном сферическом образце магнетита магнитные моменты доменов могут быть направлены вдоль восьми легких направлений, соответствующих четырем осям типа [111], а в достаточно сильном магнитном поле, например 3000 Э, достигается состояние насыщения, в котором остается один домен с моментом, почти совпадающим с осью [111] – ближайшей к направлению поля. Намагниченность однодоменного сферического образца может быть либо параллельна, либо антипараллельна одной из осей типа [111].

При намагничивании образцов магнитных материалов в них возникают напряжения, зависящие от направления и величины приложенного магнитного поля. Если направляющие косинусы вектора магнитного поля обозначить α_1, α_2, α_3, то магнитострикционная деформация λ вдоль оси с направляющими косинусами β_1, β_2 и β_3 в кристалле с кубической симметрией будет определяться формулой

$$\lambda = -\frac{1}{2}\lambda_{100} + \frac{3}{2}\lambda_{100}(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2) + $$
$$+ 3\lambda_{111}(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_1\alpha_3\beta_1\beta_3 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3).$$

Для магнетита коэффициенты магнитострикции λ_{111} и λ_{100} равны соответственно $72{,}6\cdot10^{-6}$ и $-19{,}5\cdot10^{-6}$. Чтобы получить плотность

магнитострикционной энергии, нужно умножить магнитострикционную деформацию на соответствующее напряжение. Магнитострикция поликристалла описывается одним коэффициентом

$$\lambda_s = (2\lambda_{100} + 3\lambda_{111})/5.$$

3.3. Температурные зависимости

Зависимость коэффициентов магнитокристаллической анизотропии и магнитострикции магнетита от температуры приводит к интересной температурной зависимости направления намагниченности. Основной вклад в указанные коэффициенты дает спин-орбитальное взаимодействие в ионах Fe^{2+}, сильно возрастающее при понижении температуры. В точке магнитной изотропии $T_m = 118$ К коэффициент K_1 меняет знак, и в многодоменном образце в этой точке доменные стенки размываются, а при отходе от нее восстанавливаются таким образом, что остаточная намагниченность исчезает. Это явление позволяет отличать многодоменные частицы магнетита от однодоменных и псевдооднодоменных (см., например, Levi, Merrill, 1976). Многодоменность можно также обнаружить по пику начальной восприимчивости при температуре магнитной изотропии (Senanayake, McElhinny, 1981; Murthy, Pätzold, 1982).

Микроскопический механизм, приводящий к перемене знака коэффициента K_1, объясняет и резкое возрастание коэффициентов магнитострикции при охлаждении образцов магнетита до температур, меньших T_m. Этот эффект еще не нашел применения ни в гео-, ни в биомагнетизме, хотя благодаря ему можно было бы исследовать неоднородные напряжения в магнетите, измеряя магнитострикцию или другие зависящие от нее параметры в окрестности температуры T_m.

3.4. Зависимость от давления

Анизотропия, магнитострикция и температура Кюри магнетита слабо зависят от гидростатического давления. Коэффициенты K_1 и K_2 уменьшаются с ростом давления на 5 %/кбар, а λ_{111} и λ_{100} увеличиваются на 15 %/кбар (Nagata, Kinoshita, 1967). Температура Кюри магнетита и некоторых титаномагнетитов меняется примерно на 2 К/кбар (Schult, 1970).

4. Магнитные доменные состояния

4.1. Теория доменов

Некоторые магнитные свойства, особенно коэрцитивная сила и остаточная намагниченность, очень сильно зависят от размеров частиц в образце. На рис. 2.3 схематически изображена такая зависимость коэрцитивной силы для магнетита. Здесь также указаны области, в пределах

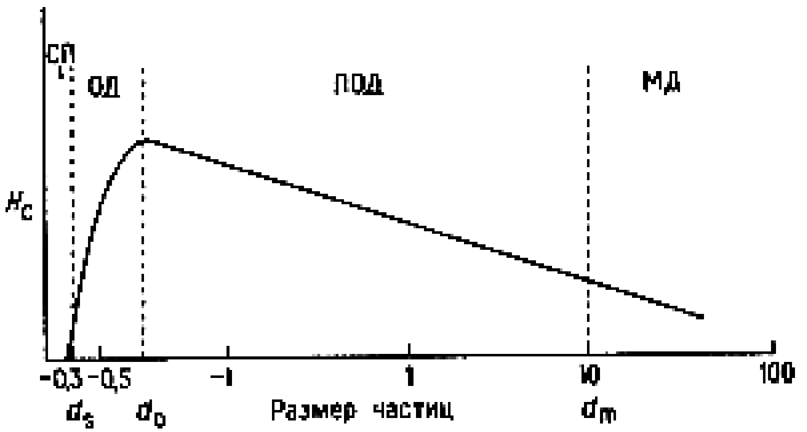


Рис. 2.3. Схематическое изображение зависимости коэрцитивной силы H_c от размера частиц образца магнетита. Пунктиром отмечены границы областей суперпарамагнитного (СП), однодоменного (ОД), псевдооднодоменного (ПОД) и многодоменного (МД) состояний.

которых имеют место суперпарамагнитное, однодоменное, псевдооднодоменное и многодоменное состояния. Коэрцитивная сила достигает максимума в однодоменном состоянии. При увеличении или уменьшении размера частиц по отношению к размеру, соответствующему этому максимуму, коэрцитивность падает вследствие появления магнитных доменов в первом случае и из-за возрастания роли тепловых флуктуаций – во втором. Во втором случае коэрцитивность падает до нуля при переходе из однодоменного в суперпарамагнитное состояние. Нужно отметить широкий диапазон размеров частиц, в котором происходят все эти явления, – от сотен ангстрем до сотен микрон.

Представление о доменах – одно из основных в магнетизме. Магнитными доменами называются области магнитного материала, внутри которых намагниченность однородна и направлена везде одинаково; направления намагниченности разных доменов могут различаться. Намагниченности доменов, направленные в противоположные стороны, могут компенсировать друг друга так, что остаточная намагниченность многодоменной частицы будет равна нулю (рис. 2.4, *А*), однодоменная же частица всегда намагничена до насыщения (рис. 2.4, Б). Поворот намагниченности от направления в одном домене к направлению в соседнем домене происходит непрерывно в области, называемой доменной стенкой. Чаще всего встречаются 180- и 90-градусные стенки, которые разделяют домены с соответствующими углами между намагниченностями (см., например, Chikazumi, 1964).

В основе образования доменов лежит достигаемый при этом выигрыш магнитной энергии. На поверхности однородно намагниченной частицы существуют магнитные полюса, взаимодействие которых дает существенный магнитостатический вклад в энергию частицы (рис. 2.4, *Б*). При возникновении доменов магнитостатическая энергия

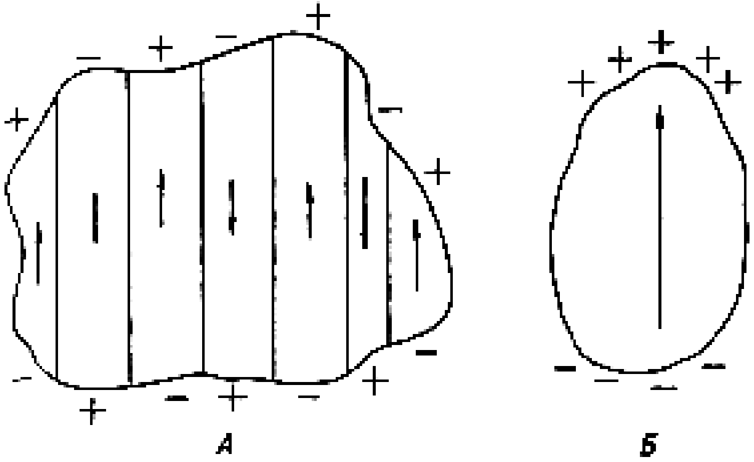


Рис. 2.4. Распределение магнитных моментов и полюсов в многодоменной (*А*) и однодоменной (*Б*) частицах.

поверхностных магнитных полюсов уменьшается (рис. 2.4, *А*); правда, появляется вклад в энергию, связанный с наличием доменных стенок. В результате минимизации этих двух энергетических вкладов при данном размере частицы, температуре и внешнем магнитном поле и возникает равновесная конфигурация доменов.

При анализе доменной структуры необходимо рассматривать несколько составляющих энергии E:

$$E = E_{обм} + E_{а} + E_{мс} + E_{мст} + E_{п}. \qquad (1)$$

Обменная составляющая $E_{обм}$ обусловлена отклонением от параллельности соседних спинов в доменной стенке, при увеличении толщины которой $E_{обм}$ уменьшается. Составляющая, связанная с магнитокристаллической анизотропией $E_{а}$, появляется из-за несовпадения направления намагниченности с направлением «легкой оси»; чем больше эта анизотропия, тем меньше толщина доменной стенки. Магнитострикционная энергия $E_{мс}$ определяет тип стенки: 180- или 90-градусная. Роль магнитостатического вклада $E_{мст}$ упомянута выше. Наконец, $E_{п}$ – это энергия моментов доменов во внешнем магнитном поле. В достаточно большом поле моменты всех доменов выстраиваются вдоль направления поля и доменные стенки исчезают. Обзоры доменной теории даны в работах Kneller, 1969; Cullity, 1972; Stacey, Banerjee, 1974.

Энергия E является функцией намагниченности, которая считается постоянной по величине, но может иметь разное направление. Условия минимума этой энергии представляют собой нелинейные уравнения в частных производных, и их решения в принципе описывают и домены, и доменные стенки, однако получение таких решений в общем случае представляет собой очень сложную математическую задачу (Brown, 1978). В ряде частных случаев (большие поля, специальная форма образца: бесконечный цилиндр, сфера) уравнения можно преобразовать

в линейные и решить. Так было получено много результатов, касающихся зарождения доменов и коэрцитивности мелких частиц (Frei et al., 1957; Brown, 1963). Часто, не решая уравнений, просто вычисляют энергию некой предполагаемой доменной конфигурации и сравнивают ее с энергией однодоменного состояния. Конфигурация с минимальной энергией, получаемая таким образом, соответствует равновесному состоянию (см., например, Butler, Banerjee 1975; Sato et al., 1982). Подобное состояние, однако, практически никогда не достигается и система доменов, как правило, оказывается в одном из метастабильных состояний. Так, после наложения и снятия поля, достаточного для достижения магнитного насыщения, наблюдалось однодоменное состояние довольно больших частиц, в которых минимальной энергией обладает многодоменное состояние (Halgedahl, Fuller, 1980); в то же время в очень малых частицах, которые должны были бы быть однодоменными, после проведения термического размагничивания обнаружены доменные стенки (Храбров и др., 1974).

4.2. Псевдооднодоменные частицы

Различия между одно- и многодоменными частицами очевидны. Свойства же частиц, размер которых несколько превышает размеры однодоменных, гораздо больше похожи на свойства этих последних, чем на свойства многодоменных. Это касается прежде всего остаточной намагниченности и коэрцитивной силы. Обладающее указанной особенностью промежуточное доменное состояние получило даже специальное название – псевдооднодоменное (Stacey, 1963). Коэрцитивная сила и остаточная намагниченность многодоменных частиц определяются сравнительно низкоэнергетическим процессом движения доменных стенок, в то время как намагничивание однодоменных частиц происходит посредством поворота магнитного момента, требующего заметно бóльшей энергии. В результате однодоменные частицы имеют бóльшую коэрцитивность и более стабильную намагниченность, чем многодоменные. Теоретически представлялось, что при переходе из одно- в многодоменное состояние должны происходить резкие изменения упомянутых магнитных свойств, однако на самом деле в псевдооднодоменной области наблюдается их постепенная эволюция. В большинстве пород, содержащих магнетит и титаномагнетит, размеры частиц значительно превышают размеры, характерные для однодоменности (см., например, Stacey, Banerjee, 1974), и в то же время образцы этих пород обладают большой коэрцитивностью и стабильной остаточной намагниченностью. Такое поведение пытались объяснить, рассматривая магнитные моменты доменных стенок (Dunlop, 1977, 1981), а также влияние поверхности частиц на магнитные свойства (Stacey, Banerjee, 1974; Banerjee, 1977). Предполагалось, что псевдооднодоменные частицы содержат всего несколько доменов (меньше десяти), но, так как доменные стенки могут занимать значительную часть объема частицы, этим можно объяснить сходство их магнитных свойств со свойствами однодоменных частиц (Butler, Banerjee, 1975; Moskowitz, Banerjee, 1979; Dunlop, 1981). Высказывалось также мнение, что в образцах, считавшихся псевдооднодоменными, все же существуют однодоменные частицы либо на границе между фазами магнетита и ильменита, либо в виде очень мелких зерен (Evans, 1977). Возможно также, что существенный вклад в магнетизм пород вносят однодоменные частицы биогенного происхождения (Kirschvink, Lowenstam, 1979; Kirschvink, 1982).

4.3. Суперпарамагнетизм

Однородная намагниченность однодоменной частицы в равновесном состоянии направлена вдоль одной из осей, соответствующих локальному минимуму энергии анизотропии. Если объем частицы достаточно мал или температура достаточно высока, может оказаться, что энергия тепловых флуктуаций достаточна для преодоления энергетического барьера ΔE, разделяющего состояния, например, с противоположными направлениями намагниченности, т.е. для спонтанного перемагничивания частицы. Магнитный момент ансамбля таких частиц будет равен нулю в нулевом внешнем поле при температуре $T > 0$, а в отличном от нуля внешнем поле будет существовать некоторый средний момент, направленный вдоль поля. Отношение намагниченности образца к намагниченности насыщения при 0 K описывается функцией Ланжевена

$$J_s(T)/J_0 = \mathrm{cth}(\mu H/kT) - (kT/\mu H), \quad (2)$$

аналогичной встречающейся в теории парамагнетизма с тем лишь отличием, что здесь μ означает магнитный момент не отдельного атома, а однодоменной частицы, состоящей из более чем 10^5 атомов. Отсюда и происхождение термина суперпарамагнетизм (Bean, Livingston, 1959; Kneller, 1969). Установление теплового равновесия в суперпарамагнетике характеризуется временем релаксации τ, выражение для которого впервые получил Неель (Néel, 1949):

$$1/\tau = f_0 \exp[-vJ_sH_k/2kT(1 - H/H_k)^2]. \quad (3)$$

Здесь f_0 – частотный фактор ($\sim 10^9$ Гц; см. McNab et al., 1968), v – объем частицы, J_s – намагниченность насыщения, H_k – внутренняя коэрцитивная сила, определяемая доминирующей анизотропией. При выводе соотношения (3) анизотропия считалась одноосной. В более общей форме его можно записать в виде (Bean, Livingston, 1959)

$$1/\tau = f_0 \exp(-\Delta E/kT), \quad (4)$$

где ΔE – энергетический барьер, разделяющий равновесные состояния с противоположными направлениями намагниченности.

Экспоненциальный характер зависимости времени релаксации от

объема v и температуры T позволяет ввести понятие температуры блокировки $T_b (T_b < T_C)$, при которой выполняется условие $\tau = 1/f_0 = t_{эксп}$ (Néel, 1949; Stacey, Banerjee, 1974) и в окрестности которой меняется характер движения намагниченности ($t_{эксп}$ – продолжительность эксперимента). Так, например, при увеличении ΔE от $18\,kT$ до $57{,}7\,kT$ (т. е. примерно в 3 раза) τ возрастает от 1 с до $4 \cdot 10^9$ лет (т. е. в 10^{17} раз). Для сферических частиц магнетита указанное изменение энергетического барьера ΔE соответствует увеличению диаметра частицы от 500 до всего 740 Å.

В рассматриваемой ситуации коэрцитивную силу можно определить в соответствии с формулой (3) как поле, в котором $\tau = t_{эксп}$, т. е.

$$H_c = H_k - [2kTH_k \ln(t_{эксп} f_0)/vJ_s]^{1/2}, \qquad (5)$$

где H_c считается функцией v, T и $t_{эксп}$ (Bean, Livingston, 1959). H_c становится равной H_k только при $T = 0$ K, а с ростом температуры H_c падает до нуля при переходе из суперпарамагнитного в однодоменное состояние. Когда независимым параметром является диаметр частиц d, соотношение (5) можно записать в виде (Kneller, Luborsky, 1963)

$$H_c = H_k [1 - (d_s/d)^{3/2}]. \qquad (6)$$

4.4. Критические размеры

4.4.1. Экспериментальные результаты

Экспериментально определить критические размеры частиц, соответствующие переходам из суперпарамагнитного в однодоменное (d_s), из однодоменного в псевдооднодоменное (d_0) и из псевдооднодоменного в многодоменное (d_m) состояния, довольно сложно, так как трудно приготовить образцы с небольшим разбросом частиц по размерам и форме. С помощью измерений отношения остаточной намагниченности к намагниченности насыщения J_r/J_s при температурах 77 и 300 K для образцов магнетита с зернами примерно сферической формы были найдены значения d_s и d_0. Оказалось, что при комнатной температуре $d_s = (290 \div 360) \pm 50$ Å, а $d_0 < 480 \pm 50$ Å (Dunlop, 1973). Анализ тепловых флуктуаций дал значение $d_s = 250$ Å (Dunlop, Bina, 1977). Эти данные свидетельствуют о том, что в исследованных образцах магнетита при комнатной температуре может и не быть области стабильности однодоменного состояния, а суперпарамагнитное состояние превращается сразу в многодоменное (Dunlop, 1973). Во всяком случае однодоменное состояние существует в очень узком интервале размеров частиц – $300 \div 500$ Å. Однако даже небольшая эллипсоидальность частиц магнетита должна приводить к стабилизации однодоменного состояния при комнатной температуре (Butler, Banerjee, 1975; Dunlop, 1981). Интересно отметить, что

частицы биогенного магнетита в большинстве случаев в той или иной степени вытянуты (Kirschvink, Gould, 1981; Towe, Moench, 1981).

Из данных по термоостаточной намагниченности и коэрцитивной силе магнетита для d_m было получено значение, равное 20 мкм (Parry, 1965). В других работах приводятся значения d_m, лежащие между 10 и 20 мкм. Хотя эти результаты очень важны для понимания магнетизма пород, они не имеют отношения к биологическим системам, поскольку встречающиеся там частицы магнетита имеют гораздо меньшие размеры.

Нижняя граница размеров однодоменности частиц маггемита находится около 400 Å при комнатной температуре (Berkowitz et al., 1968), а теоретическая оценка верхней границы слегка превышает значения, полученные для магнетита (Morrish, Yu, 1955; Morrish, Watt, 1957). Экспериментальные данные для верхней границы однодоменности в маггемите отсутствуют. Относительно магнетита с замещением части ионов Fe на ионы Ti известно, что это увеличивает размеры частиц, соответствующие переходам между различными доменными состояниями (Butler, Banerjee, 1975; Day et al., 1977).

4.4.2. Теоретические результаты

Трудности экспериментального определения критических размеров частиц магнетита стимулировали теоретические работы по их оценке. Несколько статей посвящено вычислению величин d_s и d_0 (Morrish, Yu, 1955; Frei et al., 1957; Murthy et al., 1971; Evans, 1972; Butler, Banerjee, 1975; Moskowitz, Banerjee, 1979).

При расчете d_0 важно знать, какое из состояний неоднородного намагничивания является основным (т. е. обладающим наименьшей энергией) для частиц такого размера. В качестве основного состояния предполагались круговая спиновая конфигурация (Morrish, Yu, 1955), ротационная мода (Frei et al., 1957), двухдоменная структура (Butler, Banerjee, 1975). В последней работе сделана попытка доказать, что наименьших энергетических затрат требует переход из одно- в двухдоменное состояние в случае частиц, имеющих форму параллелепипеда. Косвенным аргументом в пользу теории, использующей модель перехода между одно- и двухдоменным состояниями, может служить весьма правдоподобное соображение о том, что частицы биогенного магнетита должны быть однодоменными (Kirschvink, Lowenstam, 1979), а также тот факт, что почти во всех случаях размеры этих частиц лежат в области однодоменности, предсказываемой упомянутой моделью (Butler, Banerjee, 1975). Однако нужно отметить, что все теоретические оценки согласуются с данными эксперимента с точностью до множителя, равного 2. Значение d_s можно найти, если положить $H_c = 0$ в выражении (5) (Butler, Banerjee, 1975). В табл. 2.2 суммированы теоретические и экспериментальные оценки d_s, d_0 и d_m для магнетита.

Таблица 2.2. Критические размеры зерен магнетита (в мкм)

Источник данных	d_s	d_0	d_m
Эксперимент			
Dunlop, 1973	0,029–0,036[1]	<0,048[1]	—
Dunlop, Bina, 1977	0,025[2]	—	—
Day et al., 1977		<0,1[3]	10–20[3]
Parry, 1965			15–20[4]
Теория			
Morrish, Yu, 1955		0,047[5]	8[7]
Frei et al., 1957		0,048–0,058[6]	
Butler, Banerjee, 1975	0,05[7]	0,076[7]	
Moskowitz, Banerjee, 1979		0,080[7]	
		0,44[8]	

[1] Примерно сферические частицы ($a/b = 1$, a и b – оси эллипсоида, близкого по форме к форме частиц образца).
[2] Экстраполяция данных по тепловым флуктуациям.
[3] Синтетический образец, влажный помол, дающий зерна нерегулярной формы.
[4] Природный образец, помол, дающий зерна нерегулярной формы.
[5] Круговая спиновая конфигурация ($a/b = 1$).
[6] Ротационная спиновая конфигурация, частицы в виде бесконечных цилиндров и шаров.
[7] Двухдоменная конфигурация ($a/b = 1$).
[8] Двухдоменная конфигурация ($a/b \simeq 0,4$).

4.5. Коэрцитивность

Коэрцитивность – в некотором смысле «внешнее» магнитное свойство, зависящее от размера (рис. 2.3) и формы частиц магнетика, силы магнитного взаимодействия между частицами, давления, температуры. Коэрцитивной силой H_c называют поле, которое нужно приложить, чтобы довести намагниченность образца до нуля, причем это поле должно иметь направление, противоположное направлению первоначального намагничивания (рис. 2.5). Другой величиной, характеризующей коэрцитивность, является коэрцитивная сила по остаточной намагниченности H_{rc}, т. е. поле, необходимое для обращения в нуль остаточной намагниченности насыщения J_{rs}.

В однодоменном состоянии коэрцитивная сила зависит от диаметра частицы d как $a - bd^{-3/2}$ ($d_s < d < d_o$, a и b константы). Эта зависимость хорошо объясняется действием тепловых флуктуаций (см., например, Kneller, 1969). При $d > d_o$ коэрцитивная сила примерно обратно пропорциональна d, т. е. $H_c \sim d^{-n}$, $0,5 < n < 1$, причем такая зависимость еще не нашла адекватного теоретического истолкования. В суперпарамагнитном состоянии, когда $d < d_s$, коэрцитивная сила равна нулю.

Верхние теоретические пределы для H_c в отсутствие тепловых флуктуаций вычисляются в рамках модели, в которой предполагается когерентный поворот магнитных моментов всех атомов частицы, т. е. такое

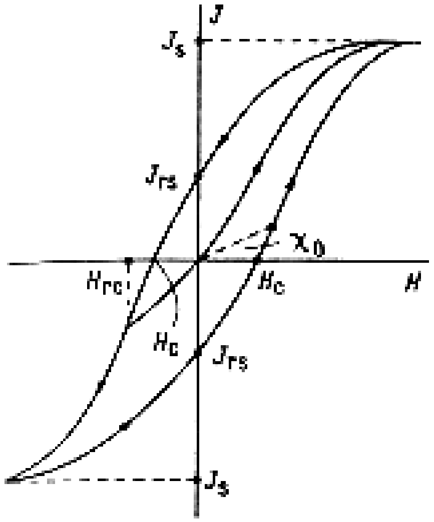


Рис. 2.5. Петля магнитного гистерезиса. J_s – намагниченность насыщения, J_{rs} – нормальная остаточная намагниченность насыщения, H_c – коэрцитивная сила, H_{rc} – коэрцитивная сила по остаточной намагниченности, χ_0 – начальная восприимчивость, H внешнее поле, J – намагниченность образца.

движение, когда эти моменты остаются все время параллельными друг другу (рис. 2.6, А). Такую модель называют также моделью однородного или когерентного поворота или моделью Стонера – Вольфарта. Нижние пределы для H_c можно оценить с помощью моделей некогерентного поворота спинов, когда магнитные моменты атомов уже не остаются параллельными в процессе перемагничивания. Такие конфигурации носят названия изгибной, ротационной и веерообразной (рис. 2.6) (Jakobs, Bean, 1955; Frei et al., 1957; Brown, 1963).

В своей классической работе 1948 г. Стонер и Вольфарт построили теорию магнитного гистерезиса и коэрцитивности в однодоменных частицах эллипсоидной формы с одноосной анизотропией. Энергия однодоменной частицы записывается в виде суммы энергии анизотропии и энергии намагниченности во внешнем поле H:

$$E = K \sin^2 \Phi - JH \cos(\theta - \Phi), \qquad (7)$$

где K – коэффициент анизотропии, а обозначения углов указаны на рис. 2.7. Когда поле параллельно длинной оси частицы ($\theta = 0$), минимизация

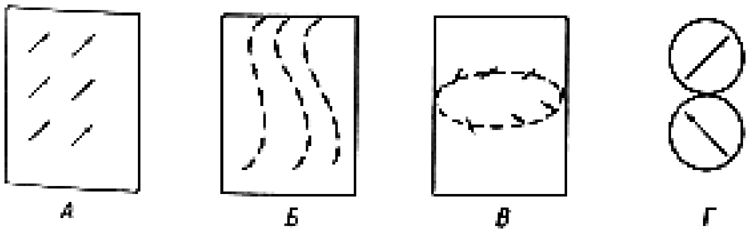


Рис. 2.6. Конфигурации магнитных моментов при перемагничивании однодоменных частиц (Kneller, 1969). *А* – однородный поворот; *Б* – изгибная конфигурация, *В* – ротационная, *Г* – веерообразная.

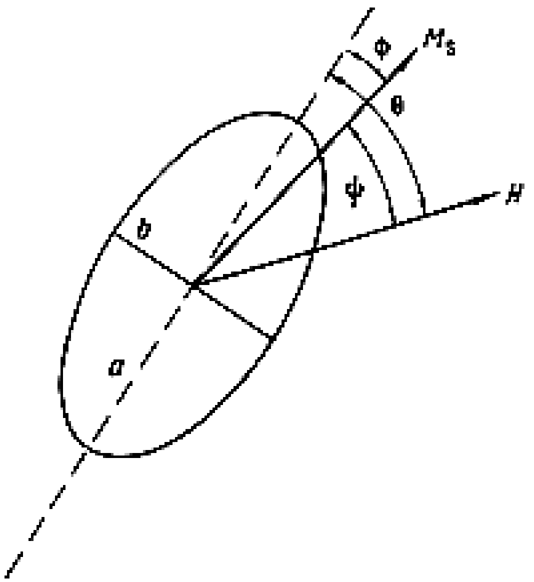


Рис. 2.7. Эллипсоидная однодоменная частица с намагниченностью J_s во внешнем магнитном поле H. Ось вращения эллипсоида показана пунктиром.

энергии (7) дает для коэрцитивной силы выражение (Stoner, Wohlfarth 1948)

$$H_c = 2K/J_s. \quad (8)$$

Коэффициент K анизотропии формы равен $\frac{1}{2}\Delta N J_s^2$, где ΔN – разность факторов размагничивания вдоль длинной (N_a) и короткой (N_b) осей эллипсоидной частицы. Максимальное значение $\Delta N = 2\pi$ достигается для образца, имеющего форму бесконечно длинной тонкой иглы, поэтому соответствующая максимальная коэрцитивная сила равна $2\pi J_s$ (см., например, Cullity, 1972), что для магнетита соответствует 3000 Э. В работе Stacey, Banerjee, 1974 для максимума H_c ошибочно приведено значение πJ_s. Для ансамбля невзаимодействующих, случайно ориентированных однодоменных частиц коэрцитивная сила равна 0,48 $(2K/J_s)$ (Stoner, Wohlfarth, 1948). Это значение больше относится к случаю пород, в которых магнитные частицы рассредоточены, а коэрцитивная сила частиц биогенного магнетита лучше описывается соотношением (8).

Расчеты в рамках модели Стонера – Вольфарта были выполнены и для случая кубической анизотропии, хотя они несколько сложнее (Johnson, Brown, 1959). Приведем выражения для компонент коэрцитивной силы, обусловленных анизотропией формы, одноосным давлением и магнитокристаллической анизотропией, полученные в той же модели:

$$H_c = \Delta N J_s \text{ – анизотропия формы,}$$

$$H_c = 3\lambda_s \sigma / J_s \text{ – одноосное давление,}$$

$$H_c = 2K_1/J_s \text{ – одноосная анизотропия,}$$

$$H_c = 4K_1/3J_s \text{ – кубическая анизотропия } (K_1 < 0).$$

Некогерентные структуры, возникающие при перемагничивании, впервые были рассмотрены в работах Jacobs, Bean, 1955; Frei et al., 1957 и Brown, 1963. Существуют прекрасные обзоры, посвященные этому механизму намагничивания (Kneller, 1969; Brown, 1963). Особый интерес для описания явлений в однодоменных частицах удлиненной формы представляет модель цепочки шаров (Jacobs, Bean, 1955). Перемагничивание в такой цепочке соприкасающихся или слегка разделенных шаров (рис. 2.6, Γ) может происходить либо путем когерентного поворота намагниченности каждого шара, либо с образованием так называемой веерообразной структуры, когда моменты соседних шаров отклоняются от локальной оси цепочки на одинаковые углы, но в разные стороны, оставаясь при этом в одной плоскости.

Представляется, что такая структура, которая наблюдалась в конгломерате однодоменных частиц (рис. 2.8, *А*), наилучшим образом моделирует цепочки магнитных частиц в бактериях, для которых характерен магнитотаксис (рис. 2.8, *Б*) (Frankel, Blakemore, 1980; Denham et al., 1980). Однако вычисленные на основе такой модели значения коэрцитивной силы более чем вдвое превышают значения, полученные в результате измерений (Denham et al., 1980), выполненных, правда, не на отдельных

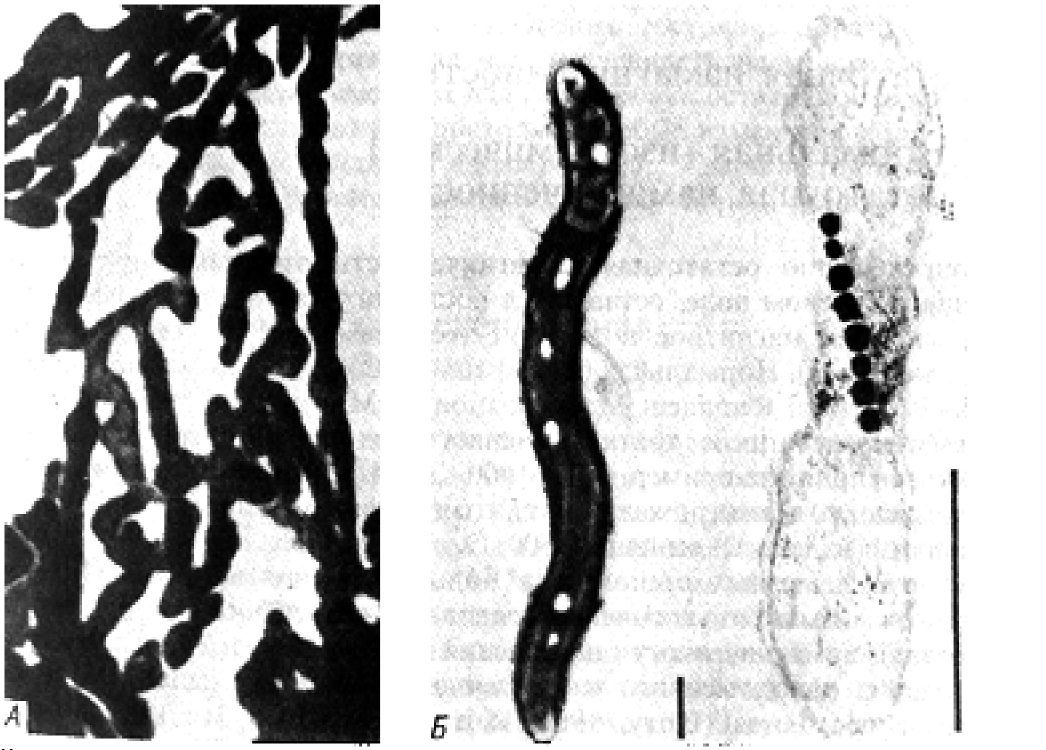


Рис. 2.8. Электронная микрофотография продолговатых частиц железа, полученных электроосаждением (*А*) (Luborsky, 1961), и проявляющие магнитотаксис бактерии спириллы MS-1 (*Б*) (Frankel, Blakemore, 1980). Размер фото *А* соответствует участку размером 0,4 × 0,7 мкм, а длина вертикальных отрезков на фото *Б* соответствует 0,5 мкм.

бактериях, а на ансамбле со случайной ориентацией, что может приводить к уменьшению коэрцитивной силы (Jacobs, Bean, 1955).

4.6. Взаимодействия

Взаимодействующие суперпарамагнитные частицы могут вести себя как однодоменные (Radhakrishnamurthy et al., 1973), а взаимодействующие однодоменные частицы – как многодоменные (см., например, Kneller, 1969). Взаимодействие частиц будет приводить к уменьшению коэрцитивной силы H_c (см., например, Dunlop, West, 1969; Cullity, 1972) и к расширению области существования однодоменного состояния (Morrish, Watt, 1957). Это косвенно подтверждается исследованием биогенного магнетита, обнаруженного в зубцах хитона, где магнитные частицы плотно упакованы и разделены слоем органического материала толщиной около 200 Å (Kirschvink, Lowenstam, 1979). Хотя размеры этих частиц лежат вне области однодоменности (см. рис. 2.3) и для *Cryptochiton stelleri* ($d > d_o$), и для *Lepidopleurus* sp ($d < d_s$), в конгломерате они должны вести себя как однодоменные (Kirschvink, Lowenstam, 1979). Имеются и другие экспериментальные доказательства взаимодействия частиц магнетита, присутствующих в зубцах хитона (Cisowski, 1981).

5. Остаточная намагниченность

5.1. Нормальная (изотермическая) остаточная намагниченность

По определению остаточная намагниченность – это намагниченность образца в нулевом поле, оставшаяся после того как он был помещен в некое внешнее магнитное поле (при этом температура или давление могли меняться). Нормальная (изотермическая) остаточная намагниченность (Isothermal Remanent Magnetization, IRM) – это намагниченность, наблюдающаяся после кратковременного (около 1 с) наложения постоянного поля (например, 10–10000 Э). Исследования магнитного гистерезиса магнетита показывают, что нормальная остаточная намагниченность в полях, меньших 500 Э, обусловлена трансляционным смещением доменных стенок, а в бо́льших полях – их необратимым поворотом. Была тщательно исследована зависимость нормальной остаточной намагниченности насыщения (SIRM) от размера частиц при переходе из однодоменного в псевдооднодоменное и далее в многодоменное состояния (Parry, 1965; Rahman et al., 1973). Для неоднодоменных частиц магнетита между коэрцитивной силой H_c и нормальной остаточной намагниченностью насыщения J_{rs} выполняется следующее приближенное эмпирическое соотношение:

$$J_{rs} \simeq H_c/N,$$

где N – фактор размагничивания, обусловленный анизотропией формы. Хотя в некоторых работах (Néel, 1955; Stacey, Banerjee, 1974) высказывалось мнение, что H_c и N можно независимо определить с помощью исследования гистерезиса, установлено, что такое нахождение N предполагает выполнение приведенного приближенного соотношения (Smith, Merrill, 1982). Существуют, однако, теоретические данные (Dunlop, 1983), свидетельствующие о том, что в частицах, содержащих от 2 до 10 доменов, вне зависимости от их намагниченности величина фактора размагничивания N действительно определяется анизотропией формы и остается постоянной в пределах $\pm(5–20)\%$. В таком случае, зная J_{rs} и H_c, можно оценить N не только в однодоменном состоянии.

Нормальная остаточная намагниченность, возникающая после наложения слабого поля (например, 20 Э), может быть сравнительно большой, однако при этом образец легко размагнитить переменным полем меняющейся полярности небольшой амплитуды ($\sim$ 20–50 Э). Размагнитить же таким способом образец из состояния насыщения нормальной остаточной намагниченности очень трудно. По этой причине при лабораторных исследованиях магнитных минералов не рекомендуется доводить нормальную остаточную намагниченность до насыщения, пока не закончены остальные испытания, поскольку такая процедура вызывает необратимые изменения магнитного состояния образца. В то же время нормальная остаточная намагниченность насыщения J_{rs} может служить удобным параметром для нормировки остаточной намагниченности природных образцов, поскольку любые изменения доли магнитной компоненты отражаются на величине J_{rs}. Такой метод был использован для сравнительного анализа лунных пород разных возрастов (Fuller, 1974).

5.2. Идеальная (безгистерезисная) остаточная намагниченность

Одним из распространенных методов исследования остаточной намагниченности, служащим прежде всего для выявления носителей магнитных свойств образца породы, является метод, использующий наведение идеальной (безгистерезисной) остаточной намагниченности (Anhysteretic Remanent Magnetization, ARM). При этом образец подвергается воздействию одновременно и переменного поля меняющейся полярности, и постоянного поля небольшой напряженности (порядка 1 Э). Амплитуда переменного поля постепенно снижается до нуля, а затем выключается и постоянное поле. Было показано (Jaep, 1971), что идеальная остаточная намагниченность J_{ARM} при комнатной температуре T_r удовлетворяет соотношению

$$J_{ARM}/J_s(T_r) = \frac{1}{3}\frac{vJ_s(T_r)}{kT_r}\left(1 - \frac{H_i}{H_c}\right)H_c,$$

где $J_s(T_r)$ – намагниченность насыщения при комнатной температуре, v – объем образца, k – постоянная Больцмана, H_c – коэрцитивная сила, H_e – внешнее постоянное поле, H_i – поле взаимодействия, т. е. среднее поле Лоренца, действующее на частицу со стороны других частиц образца. Величину H_i можно определить по зависимости J_{ARM} от H_e (Banerjee, Mellema, 1974). Для многодоменных частиц было получено выражение (Gillingham, Stacey, 1971)

$$J_{ARM} = \frac{H_e}{N}\left(\frac{1}{1 + N\chi_D}\right),$$

где H_e – внешнее поле, N – средний фактор размагничивания частиц в образце, χ_D – магнитная восприимчивость этих частиц в их собственном размагничивающем поле.

Оставляя обсуждение теории термоостаточной намагниченности до разд. 5.4, отметим лишь, что одной из причин для исследования идеальной остаточной намагниченности в однодоменных частицах магнетита было подобие между этими двумя видами остаточной намагниченности (Rimbert, 1959; Levi, Merrill, 1976). Так, можно отметить качественное подобие разупорядочивающего действия на намагниченность температуры и переменного поля в процессе достижения термоостаточной намагниченности в образце магнетита при охлаждении его ниже температуры блокировки T_b (см. следующий раздел) и в процессе получения идеальной остаточной намагниченности, когда амплитуда переменного поля на образце уменьшается до нуля. Аналогия, конечно, не строгая, но она, как показывают кривые размагничивания в переменном поле из состояний идеальной и термоостаточной намагниченности, более справедлива в случае одно- и псевдооднодоменных частиц, чем в случае многодоменных.

Частичная идеальная остаточная намагниченность определяется как остаточная намагниченность, которая возникает в результате обычной процедуры, применяющейся для наведения указанной намагниченности, в том случае, когда амплитуда переменного поля уменьшается не до нуля, а до какой-нибудь промежуточной величины. Если сравнить полную, или суммарную, идеальную остаточную намагниченность, получающуюся, когда амплитуда переменного поля уменьшается до нуля от максимальной величины H_{max}, и ряд частных, получающихся, когда эта амплитуда уменьшается сначала от H_{max} до H_n, затем от H_n до H_{n-1} и т. д. до нуля, то окажется, что суммарная идеальная остаточная намагниченность равна сумме частных, т. е.

$$\sum_n \text{Частичная идеальная остаточная намагниченность} = \text{Суммарная идеальная остаточная намагниченность.}$$

В модели идеальной остаточной намагниченности однодоменных частиц предполагается, что переменное поле определенной амплитуды действует на частицы магнетита, обладающие остаточной коэрцитивной силой по остаточной намагниченности H_{rc}, примерно равной этой амплитуде. Поэтому кривую размагничивания в переменном поле состояния с данной величиной идеальной остаточной намагниченности или кривую намагничивания, приводящего в это состояние (как функцию внешнего постоянного поля), можно рассматривать как прямой аналог спектра остаточной коэрцитивности. На образцах магнетита размером 0,2–0,4 мкм, состоящих из одного или двух доменов, было показано (Schmidbauer, Veitch, 1980), что идеальная остаточная намагниченность, достигнутая с использованием переменного поля некоторой амплитуды, может быть устранена размагничиванием в переменном поле с такой же исходной максимальной амплитудой. Все эти данные вполне оправдывают общепринятое использование кривых размагничивания магнетита (в особенности однодоменных частиц) с определенной идеальной остаточной намагниченностью переменным полем для описания распределения H_{rc} и тем самым для выявления распределения эффективных размеров частиц.

Идеальную остаточную намагниченность мы сравним с термоостаточной в разд. 5.4. До сих пор (поскольку идеальная остаточная намагниченность сопоставлялась с нормальной) постоянное магнитное поле средней напряженности (1–100 Э) всегда давало идеальную остаточную намагниченность, гораздо большую нормальной. Это связано с тем, что при формировании идеальной остаточной намагниченности постоянное поле «помогает» переменному. Значения H_{rc}, соответствующие идеальной и нормальной остаточным намагниченностям, также различны. Так, если сравнивать нормированные кривые размагничивания в переменном поле состояний с идеальной и нормальной остаточными намагниченностями, полученными при постоянном поле одной и той же величины, то окажется, что состояние с идеальной остаточной намагниченностью в магнитном отношении значительно «тверже», т. е. имеет бо́льшую величину H_{rc}, и для его размагничивания требуется переменное поле большей амплитуды. Это обстоятельство можно использовать с тем, чтобы по кривым размагничивания в переменном поле состояний с идеальной и нормальной остаточными намагниченностями выявлять в образце фракции с большими и малыми значениями H_{rc} соответственно.

5.3. Химическая остаточная намагниченность

Чтобы пояснить происхождение химической остаточной намагниченности (Chemical Remanent Magnetization, CRM), обратимся к введенному выше понятию суперпарамагнетизма. Намагниченность однодоменной частицы магнетита достигает своего термодинамически равновесного значения в процессе релаксации, описываемом временем релаксации τ, которое удовлетворяет соотношению

$$\frac{1}{\tau} = f_0 \exp(-\Delta E/kT),$$

где f_0 – частотный фактор ($\sim 10^9$ Гц), ΔE – энергетический барьер, разделяющий состояния с противоположными направлениями намагниченности J_s, k – постоянная Больцмана, T – температура. В отсутствие внешнего магнитного поля энергия ΔE в магнетите определяется главным образом анизотропией формы, т. е. фактором размагничивания N. Когда образец представляет собой правильный шар, основной вклад в энергию ΔE вносит уже магнитокристаллическая анизотропия. В любом случае ΔE пропорциональна объему образца v, и время релаксации τ, таким образом, зависит от этого объема и от температуры T.

На рис. 2.9 приведены экспоненциальные температурные зависимости времени релаксации τ для двух значений объема $v = v_2 > v_1$. Точкой A отмечено состояние частицы магнетита, имеющей характерный размер $d \ll d_s$ (максимальный размер суперпарамагнитной частицы) и поэтому не обладающей остаточной намагниченностью. Если же вследствие какого-нибудь физико-химического процесса (например, окисления, гидролиза или дегидратации) объем частицы увеличится от v_1 до v_2, то точка, отвечающая ее состоянию, перейдет из A в B, где, предположим, время релаксации значительно больше времени эксперимента ($\tau \gg t_{эксп}$) и новый размер частицы $d \gg d_s$. Где-то между точками A и B будет достигнут так называемый объем блокировки v_b (размер блокировки d_b), когда возникнет остаточная намагниченность, а в точке B, если τ будет достаточно велико, эта остаточная намагниченность (называемая химической) уже станет стабильной во времени, а также по отношению к воздействию температуры и магнитного поля. Химическая остаточная намагниченность, возникающая в описанном процессе роста частиц, будет существенно больше нормальной. Экспериментально было показано (Kobayashi, 1959), что химическая остаточная намагниченность магнетита, образующегося в результате окисления гематита, также значительно устойчивее к размагничиванию в переменном магнитном поле, чем нормальная остаточная намагниченность. Химическая остаточная намагниченность однодоменных частиц пропорциональна внешнему постоянному полю H и обратно пропорциональна энергии анизотропии при температуре формирования этой остаточной намагниченности. Эти обстоятельства будут обсуждаться ниже, в разделе, посвященном термоостаточной намагниченности.

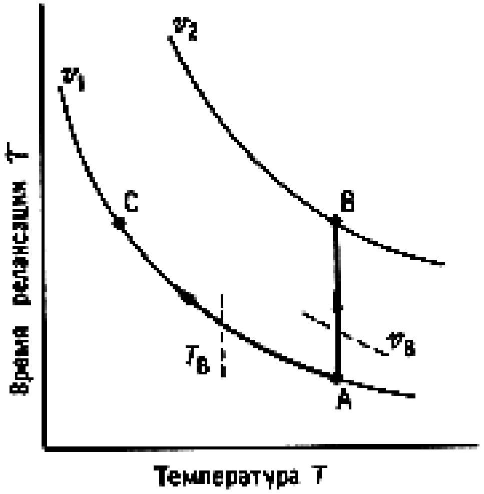


Рис. 2.9. Схематическое изображение температурных зависимостей времени релаксации магнитного момента частиц магнетита различных объемов ($v_2 > v_1$).

Из описания процесса возникновения химической остаточной намагниченности становится ясно, что остаточная намагниченность однодоменных частиц магнетита биологического происхождения является химической. Именно поэтому такие частицы представляют собой хороший объект для исследования указанного типа остаточной намагниченности.

После гибели бактерий, для которых характерен магнитотаксис, содержащиеся в них кристаллы магнетита выпадают в осадок, который тем самым приобретает некоторую седиментационную или постседиментационную остаточную намагниченность (DRM и PDRM). Подтвержденных случаев такого явления, однако, еще мало (см., например, Kirschvink, 1982).

5.4. Термоостаточная намагниченность

Опишем происхождение термоостаточной намагниченности (Thermoremanent Magnetization, TRM) с использованием понятия суперпарамагнетизма аналогично тому, как это было сделано выше для химической остаточной намагниченности. Показано, что химическая остаточная намагниченность возникает, когда время релаксации τ становится больше времени эксперимента $t_{эксп}$ в результате того, что объем частицы превышает величину v_b – объем блокировки (рис. 2.9). Тот же эффект, т. е. возникновение остаточной намагниченности, может быть достигнут при охлаждении образца ниже температуры блокировки T_b, что будет соответствовать, например, переходу из точки A в точку C вдоль линии постоянного объема. Термоостаточной и называется остаточная намагниченность, которая «замораживается» в образце, когда описанный процесс происходит в магнитном поле. Температура блокировки здесь может зависеть и от скорости охлаждения, и от напряженности поля, при этом увеличение скорости охлаждения приводит к росту температуры блокировки (York, 1978; Dodson, McClelland-Brown, 1980; Halgedahl et al., 1980), а магнитное поле средней напряженности (10–100 Э) уменьшает эту температуру (Sugiura, 1980; Clauter, Schmidt, 1981).

Термоостаточная намагниченность J_{TRM} однодоменных невзаимодействующих частиц прямо пропорциональна внешнему полю H_e для малых полей (0,1–1 Э), т. е. $J_{TRM}/J_s(T_r) = CH_e$, где $C = vJ_{sb}/3kT_b$, v – средний объем частиц, J_{sb} – намагниченность насыщения при температуре T_b (Néel, 1949). Казалось бы, эти соотношения могли послужить археомагнитологам основой для определения значений магнитного поля Земли по магнитным данным, получаемым на археологических материалах, однако теоретически предсказываемое значение константы C существенно превосходит реальную. За три десятилетия, прошедшие с момента

появления пионерской работы Нееля, разрешить это противоречие так и не удалось. Один из предлагавшихся путей состоял в оценке уменьшения J_{TRM} из-за взаимодействия между частицами (Dunlop, 1968), но при количественной разработке этого подхода также возник ряд проблем. Другая попытка объяснения упомянутого расхождения теории и эксперимента заключалась в использовании того факта, что большинство частиц, обладающих термоостаточной намагниченностью, являются не однодоменными, как предполагалось в теории, а псевдооднодоменными и потому дают меньший вклад в J_{TRM}. При сравнении (Dunlop et al., 1974) предположений, сделанных в рамках модели псевдооднодоменных частиц (Stacey, Banerjee, 1974), с результатами измерений магнитных моментов таких частиц было получено удовлетворительное согласие данных. Однако в обзоре теорий термоостаточной намагниченности (Day, 1977) все же отмечалось отсутствие приемлемого объяснения этого явления для частиц магнетита с различными доменными состояниями. В недавних работах, посвященных термоостаточной намагниченности в однодоменных частицах магнетита, применялась функция Ланжевена с учетом всех восьми легких осей кристалла этого вещества (R. J. Luce, V. A. Schmidt, F. Keffer, 1983, частное сообщение). Будет интересно узнать, сможет ли эта модель полнее описать результаты эксперимента. Термоостаточная намагниченность в многодоменных частицах магнетита теоретически исследовалась во многих работах (последняя из них – Merrill, 1981), но модели, адекватно описывающей ситуацию во всей ее сложности, также еще не построено.

Важно провести сравнение термоостаточной намагниченности с химической и идеальной остаточными намагниченностями. Было обнаружено (Kobayashi, 1959), что по устойчивости к размагничиванию в переменном поле химическая остаточная намагниченность ближе к суммарной термоостаточной намагниченности, чем к частичной термоостаточной намагниченности, приобретаемой образцом магнетита при охлаждении от температуры его образования. Это положение представляется достаточно обоснованным, хотя примеров исследования химической и термоостаточной намагниченностей на одних и тех же образцах не так много. Как уже отмечалось в этом разделе, устойчивость идеальной и термоостаточной намагниченностей к размагничиванию в переменном поле в целом примерно одинакова. Отношение самих этих намагниченностей для однодоменных частиц достигает единицы при повышении температуры (Banerjee, Mellema, 1974) и сильно зависит от размера частиц (Levi, Merrill, 1976), поэтому, не зная размеров частиц, трудно найти J_{TRM} по J_{ARM}, и наоборот.

6. Магнитная гранулометрия

Некоторые магнитные параметры могут быть использованы для определения состояния системы магнитных моментов в образце и косвенно – для получения информации о размере магнитных частиц в нем.

Однако интерпретация результатов такого исследования часто бывает затруднена для образцов, которые помимо чистого магнетита содержат его оксиды и титаномагнетиты, причем частицы, из которых состоит образец, могут находиться и в суперпарамагнитном, и в одно- или многодоменном состояниях (Senanayake, McElhinny, 1981; Clark, Schmidt, 1982).

Хорошими индикаторами доменного состояния служат такие параметры петли гистерезиса, как отношения J_r/J_s и H_{rc}/H_c. В однодоменных частицах $J_r/J_s > 0{,}5$ и $1 < H_{rc}/H_c < 2$; для многодоменных $0{,}01 < J_r/J_s < 0{,}3$ и $2 < H_{rc}/H_c < 5$; для суперпарамагнитных частиц $J_r/J_s \ll 0{,}1$ и $H_{rc}/H_c > 10$. Строго говоря, в суперпарамагнитных частицах и J_r, и $H_c = 0$, но обычно присутствующая примесь однодоменных частиц приводит к малым, но все же отличным от нуля значениям намагниченности насыщения и коэрцитивной силы (Wasilewski, 1973; Dunlop, 1981). Измерения, проведенные на частицах магнетита, выделенного из бактерий, для которых характерен магнитотаксис, дают $J_r/J_s = 0{,}47$ и $H_{rc}/H_c = 1{,}23$, что свидетельствует об однодоменности таких частиц (Denham et al., 1980).

Параметры J_r/χ_0 и χ_0/J_s могут быть полезны для выявления суперпарамагнитного состояния, для которого $J_r/\chi_0 < 0{,}12$ Э, в отличие от одно- и многодоменного состояний, где J_r/χ_0 может принимать значения от 20 до 700 Э (Thompson et al., 1980). Отношение χ_0/J_s для одно- и многодоменных частиц магнетита редко превышает $0{,}7 \cdot 10^{-3}$ $Э^{-1}$; если оно оказывается значительно больше указанной величины, можно предположить, что существует суперпарамагнитная компонента (Dunlop, 1981). Идеальная остаточная намагниченность J_{ARM} значительно больше зависит от наличия однодоменных и псевдооднодоменных частиц в образце, чем от присутствия более крупных многодоменных, которые сильнее влияют на начальную восприимчивость χ_0. Если построить зависимость J_{ARM} или χ_{ARM} (т. е. восприимчивости, характеризующей зависимость J_{ARM} от внешнего поля при значениях напряженности до 1 Э) от χ_0 для образца чистого магнетита, содержащего частицы разных размеров, то на ней будут видны плавные изменения наклона, соответствующие переходам от многодоменного к псевдооднодоменному и далее к однодоменному состояниям (King et al., 1982). Эта зависимость может служить основой быстрого метода магнитной гранулометрии (Banerjee et al., 1981; King et al., 1982).

Другие методы магнитной гранулометрии предполагают проведение измерений при повышенных температурах. В методе анализа тепловых флуктуаций (Dunlop, 1976) используется введенное Неелем понятие поля тепловой флуктуации H_q. Температурные зависимости параметров петли гистерезиса J_s, H_c, H_{rc} позволяют определить средний объем магнитных частиц в образце. Метод теплового размагничивания частичной термоостаточной намагниченности (Bol'shakov, Shcherbakova, 1979) основан на том, что термоостаточная намагниченность однодоменных частиц исчезает при нагревании образца до температуры блокировки, в то время как для

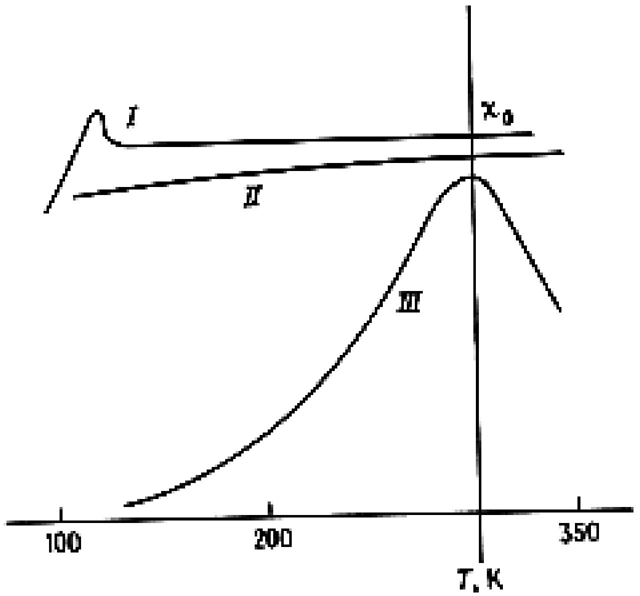


Рис. 2.10. Схематические температурные зависимости начальной восприимчивости частиц магнетита, находящихся при комнатной температуре (300К) в различных доменных состояниях: *I* – многодоменном, *II* – однодоменном, *III* – суперпарамагнитном.

полного размагничивания многодоменных частиц необходимо нагревание до температуры Кюри. Результаты упомянутой работы свидетельствуют о нарушении отмеченной Неелем аддитивности термоостаточной намагниченности, что противоречит данным работы Levi, Merrill, 1976. Это противоречие еще предстоит разрешить.

Низкотемпературные (77–300 K) измерения коэрцитивной силы, остаточной намагниченности и начальной восприимчивости также могут использоваться для диагностики доменных состояний. Температурные зависимости начальной восприимчивости χ_0 для частиц магнетита, находящихся при комнатной температуре в различных доменных состояниях, схематически изображены на рис. 2.10. Между точкой изотропии T_m и температурой Кюри восприимчивость χ_0 многодоменных частиц практически не зависит от температуры (Stacey, Banerjee, 1974), однако около точки изотропии наблюдается характерный пик. Для однодоменных частиц восприимчивость χ_0 определяется комбинацией магнитокристаллической анизотропии и анизотропии формы. Восприимчивость χ_0 продолговатых однодоменных частиц, в которых преобладает анизотропия формы, немного уменьшается при понижении температуры, и пик при 118 K отсутствует. Этот пик имеется на температурной зависимости χ_0 для однодоменных частиц, обладающих преимущественно магнитокристаллической анизотропией, но здесь он значительно менее выражен, чем на температурной зависимости χ_0 многодоменных частиц (Clark, Schmidt, 1982). Наиболее сильные изменения с температурой претерпевает χ_0 суперпарамагнитных частиц: при понижении температуры от комнатной до температуры блокировки она падает в 20–200 раз (Stephenson, 1970; Clark, Schmidt, 1982).

При охлаждении суперпарамагнитных частиц ниже температуры блокировки наблюдается также сильное возрастание J_r и H_c (см., например, рис. 6 в работе Kirschvink, Lowenstam 1979). В одно- и многодоменных

частицах эти параметры не меняются так сильно при понижении температуры. Коэрцитивная сила H_c и остаточная намагниченность J_r многодоменных частиц уменьшаются при переходе температуры T_m вследствие изменения анизотропии, а H_c и J_r однодоменных частиц с преобладающей анизотропией формы немного увеличиваются в соответствии с ростом J_s. Температурные зависимости остаточной намагниченности J_r и восприимчивости χ_0 однодоменных и суперпарамагнитных частиц можно использовать для анализа распределения частиц по размерам (см., например, Kneller, 1969; Stephenson, 1970). Магнитные свойства частиц магнетита в разных доменных состояниях суммированы в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Магнитные свойства частиц магнетита в различных доменных состояниях

Параметры и зависимости	Доменные состояния		
	суперпарамагнитное	однодоменное	многодоменное
J_r/J_s	$\ll 0{,}01$	0,3–0,5	0,01–0,3
H_{cr}/H_c	$\gg 10$	1–2	3–5
J_r/χ_0	<0,12 Э	20–700 Э	20–700 Э
χ_0/J_r	>0,007 Э$^{-1}$	0,007 Э$^{-1}$	0,007 Э$^{-1}$
$\chi_0(T)$	Сильно уменьшается	Слабо уменьшается	Пик при $T \simeq 118$K
$H_c(T)$	Сильно увеличивается	Слабо увеличивается	Уменьшается при $T \simeq 118$ K
$J_r(T)$	Сильно увеличивается	Слабо увеличивается	Уменьшается при $T \simeq 118$ K

Литература

Bailey M.E., 1975. The magnetic properties of pseudo-single domain grains, M. Sc. thesis, University of Toronto.

Banerjee S. K. (1977). On the origin of stable remanence in pseudo-single domain grains, J. Geomagn. Geoelectr., 24, 319–330.

Banerjee S. K., Mellema J. P. (1974). A new method for determination of paleointensity from the A.R.M. properties of rocks, Earth Planet. Sci Lett., 23, 177–184.

Banerjee S. K., King J., Marvin J. (1981). A rapid method for magnetic granulometry with applications to environmental studies, Res. Lett., 8, 333–336.

Bate G., 1980. Recording materials. In: Ferromagnetic Materials, Vol. 2 (E. P. Wohlfarth, ed.), North-Holland, Amsterdam, pp. 381–507.

Bean C. P., Livingston J. D. (1959). Superparamagnetism, J. Appl. Phys., 30, 1205–1295.

Berkowitz A. E., Schuele W. J., Flanders P. J. (1968). Influence of crystallite size in the magnetic properties of acicular γ-Fe_2O_3 particles, J. Appl. Phys., 39, 1261–1263.

Bickford L. R. (1953). The low temperature transformation in ferrite, Rev. Mod. Phys., 25, 75–79.

Bol'shakov A. S., Shcherbakova V. V. (1979). Thermomagnetic criterion for determining the domain structure of ferrimagnetics, Phys. Solid Earth., 15, 111–117.

Brown W. F., Jr., 1963. Micromagnetics, Interscience, New York.
[Имеется перевод: Браун У. Ф. Микромагнетизм.– М.: Наука, 1979.]

Brown W. F., Jr., (1978). Domains, micromagnetics, and beyond: Reminiscences and assessments, J. Appl., Phys., 49, 1937–1942.
Butler R. F., Banerjee S. K. (1975). Teoretical single-domain grain size range in magnetite and titanomagnetite, J. Geophys. Res., 80, 4049–4058.
Chikazumi S., 1964. Physics of Magnetism, Wiley, New York. [Имеется перевод: Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма.– М.: Мир, 1983.]
Cisowski S. (1981). Interacting vs. non-interacting single domain behavior in natural and synthetic samples, Phys. Earth Planet. Inter., 26, 52–56.
Clark D. A., Schmidt P. W. (1982). Theoretical analysis of thermomagnetic properties, low-temperature hysteresis and domain structure of titanomagnetites, Phys. Earth Planet. Inter., 30, 300–316.
Clauter D. A., Schmidt V. A. (1981). Shifts in blocking temperature spectra for magnetite powders as a function of grain size and applied magnetic field, Phys. Earth Planet. Inter., 26, 81–92.
Cullity B. D., 1972. Introduction to Magnetic Materials, Addison – Wesley, Reading, Mass.
Day R. (1977). TRM and its variation with grain size, Adv. Earth Planet. Sci., 1 1–33.
Day R., Fuller M. D., Schmidt V. A. (1977). Hysteresis propeties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence, Phys. Earth Planet. Inter., 13, 1206–1216.
Denham C. R., Blakemore R. P., Frankel R. B. (1980). Bulk magnetic properties of magnetostatic bacteria, IEEE Trans. Magn., Mag-16, 1006–1007.
Dodson M. H., McClelland-Brown E. (1980). Magnetic blocking temperatures of single-domain grains during slow cooling, J. Geophys. Res., 85, 2625–2637.
Dunlop D. J. (1968). Monodomain theory: Experimental verification, Science, 162 256–258.
Dunlop D. J. (1973). Superparamagnetic and single domain threshold sizes in magnetite, J. Geophys. Res., 78, 1780–1793.
Dunlop D. J. (1976). Thermal fluctuation analysis: A new technique in rock magnetism, J. Geophys. Res., 81, 3511–3517.
Dunlop D. J. (1977). The hunting of the psark, J. Geomagn. Geoelectr., 24, 243–318.
Dunlop D. J. (1981). The rock magnetism of fine particles, Phys. Earth Planet. Inter., 26, 1–26.
Dunlop D. J. (1983). On the magnetizing energy and demagnetizing factor of a multidomain ferromagnetic cube, Geophys. Res. Lett., 10, 79–82.
Dunlop D. J., Bina M. M. (1977). The coercive force spectrum of magnetite at high temperatures: Evidence for thermal activation below the blocking temperature, Geophys. J. R. Astron. Soc., 51, 121–147.
Dunlop D. J., West G. F. (1969). An experimental evaluation of single domain theories, Rev. Geophys. Space Phys., 1, 709–757.
Dunlop D. J., Stacey F. D., Gillingham D. E. W. (1974). The origin of thermoremanent magnetization: Contribution of pseudo-single-domain magnetic moments, Earth Planet. Sci. Lett., 21, 288–294.
Evans M. E. (1972). Single domain particles and TRM in rocks, Commun. Earth Sci. Geophys., 2, 139–148.
Evans M. E. (1977). Single domain oxide particles as a source of thermoremanent magnetization, J. Geomagn. Geoelectr., 29, 267–276.
Frankel R. B., Blakemore R. P. (1980). Navigational compass in magnetic bacteria J. Magn. Magn. Mater., 15-18, 1562–1564.
Frankel R. B., Blakemore R. P., Wolfe R. S. (1979). Magnetite in freshwater magnetotactic bacteria, Science, 203, 1355–1356.
Frei E. H., Shtrikman S., Treves D. (1957). Critical size and nucleation field of idea ferromagnetic particles, Phys. Rev., 106, 446–455.
Fuller M. (1974). Lunar magnetism, Rev. Geophys. Space Phys., 12, 23–70.
Gillingham D. E. W., Stacey F. D. (1971). Anhysteretic remanent magnetizatio (ARM) in magnetic grains, Pure Appl. Geophys., 8, 160–165.
Goodenough J. B., 1963. Magnetism and the Chemical Bond, Wiley-Interscience.

Gorter E. W. (1955). Some properties of ferrites in connection with their chemistry, Proc. Inst. Radio Eng., 43, 1945–1973.
Halgedahl S., Fuller M. (1980). Magnetic domain observations of nucleation processes in fine particles of intermediate titanomagnetite, Nature, 288, 70–72.
Halgedahl S., Day R., Fuller M. (1980). The effect of cooling rate on the intensity of weak-field TRM in single-domain magnetite, J. Geophys. Res., 85, 3690–3698.
Hamilton W. C. (1958). Neutron diffraction investigation of the 119 K transition in magnetite, Phys. Rev., 110, 1050–1057.
Ishikawa Y., Syono Y., Akimoto S. (1964). Neutron diffraction study of Fe_3O_4–Fe_2TiO_4 series, Annu. Prog. Rep. Rock Magn. Res. Group Jpn., 14.
Jacobs I. S., Bean C. P. (1955). An appproach to elongated fine-particle magnets, Phys. Rev., 100, 1060–1067.
Jaep W. F. (1971). Role of interactions in magnetic tapes, J. Appl. Phys., 42, 2790–2794.
Johnson C. E., Brown W. F. (1959). Stoner – Wohlfarth calculation on particles with both magnetocrystalline and shape anisotropy, J. Appl. Phys., 30, 3205–3225.
Храбров В. Н., Оноприенко Л. Г., Шур С. (1974). ЖЭТФ, 67, 344–350.
King J., Banerjee S. K., Marvin J., Özdemir Ö. (1982). A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: Some results from lake sediments, Earth Planc. Sci. Lett., 50, 404–419.
Kirschvink J. L. (1982). Paleomagnetic evidence for fossil biogenic magnetite in western Crete, Earth Planet. Sci. Letter, 54, 388–392.
Kirschvink J. L., Gould J. L. (1981). Biogenic magnetite as a basic for magnetic field detection in animals, Biosystems, 13, 181–201.
Kirschvink J. L., Lowenstam H. A. (1979). Mineralization and magnetization of chiton teeth: Paleomagnetic, sedimentologic, and biologic implications of organic magnetic, Earth Planet. Sci. Lett., 44, 193–204.
Kneller E., 1969. Fine particle theory. In: Magnetism and Metallurgy, Vol. 1 (A. E. Berkowitz and E. Kneller, eds.), Academic Press, New York, pp. 366–465.
Kneller E., Luborsky F. E. (1963). Particle size dependence of coercivity and remanence of single-domain particles, J. Appl. Phys., 34, 656–658.
Kobayashi K. (1959). Chemical remanent magnetization of ferromagnetic minerals and its application to rock magnetism, J. Geomagn. Geoelectr., 10, 99.
Levi S., Merrill R. T. (1976). A comparison of ARM and TRM in magnetite, Earth Planet. Sci. Lett., 32, 171–184.
Lindsley D. H. (1976). The crystal chemistry and structure of oxide minerals as exemplified by the Fe-Ti oxides. In: Oxide Minerals Short Course Notes (D. Rumble, ed.), Southern Printing Co., Blacksburg, Va., pp. L1–L52.
Lubrosky F. E. (1961). Development of elongated particle magnes., J. Appl. Phys., 32, 1715–1835.
McNab T. R., Fox R. A., Boyle A. J. F. (1968). Some magnetic properties of magnetic (Fe_3O_4) microcrystals, J. Appl. Phys., 39, 5703–5711.
Merrill R. T. (1981). Toward a better theory of thermal remanent magnetization, J. Geophys. Res., 86, 937–949.
Morrish A. H., Watt A. R. (1957). Effect of the interaction between magnetic particles on the critical single-domain size, Phys. Rev., 105, 1476–1478.
Morrish A. H., Yu S. P. (1955). Dependence of the coercive force on the density of some iron oxide powders, J. Appl., Phus., 26, 1049–1055.
Moskowitz B. M. (1981). Methods for estimating Curie temperatures of titanomaghemites from experimental J_s–T data, Earth Planet. Sci. Lett., 53, 84–88.
Moskowitz B., Banerjee S. K. (1979). Grain size limits for pseudosingle domain behavior in magnetite: Implications for paleomagnetism. IEEE Trans. Magn., Mag-15, 1241–1246.
Murthy G. S., Pätzold R. (1982). Magnetic granulometry results from intrusive rock samples, Nature, 295, 688–690.
Murthy G. S., Evans M. E., Gough D. I. (1971). Evidence for single domain magnetite in the Michikaman anorthosite. Can. J. Earth Sci., 8, 361–370.

Nagata T., Kinoshita H. (1967). Effect of hydrostatic pressure on magnetostriction and magnetocrystalline anisotropy of magnetite, Phys. Earth Planet. Inter., 1, 44–48.
Néel L. (1949). Théorie du trainage magnétique des ferromagnetiques en grains fins avel applications aux terres cuites, Ann. Geophys., 5, 99–136.
Néel L. (1955). Some theoretical aspects of rock magnetism, Adv. Phys., 4, 191–242.
Parker R., 1975. Electrical transport properties. In: Magnetic Oxides (D.J. Craik, ed.), Wiley, New York, pp. 421–482.
Parry L.G. (1965). Magnetic properties of dispersal magnetic powders, Philos. Mag., 11, 303–312.
Pauthener R. (1950). Variation thermique de l'aimantation spontanée des ferrites de nickel, cobalt, fer et manganèse, C. R. Acad. Sci., 230, 1842–1844.
Radhakrishnamurthy C., Sastry N.P., Deutsch E.R. (1973). Ferromagnetic behavior of interacting superparamagnetic particle aggregates in basaltic rocks, Pramana, 1, 61–65.
Rahman A.A., Duncan A.D., Parry L.C. (1973). Magnetization of multidomain magnetite particles, Riv. Ital. Geofis., 22, 256–266.
Rimbert J. (1959). Contribution àl'étude de l'action de champs alternatifs sur les aimantations rémanents des roches: Applications géophysiques, Rev. Inst. Fr. Pet., 14, 123–155.
Sato M., Yoshihiro I., Nakae H. (1982). Magnetic domain structures and domain walls in iron fine particles., J. Appl. Phys., 53, 6331–6334.
Schmidbauer E., Veitch R.J. (1980). Anhysteretic remanent magnetization of small multidomain Fe_3O_4 particles dispersed in various concentrations in a non-magnetic matrix, J. Geophys., 48, 148–152.
Schult A. (1970). Effects of pressure on Curie point of titanomagnetite (1-x) $Fe_3O_4 \cdot xFe_2TiO_4$, Earth Planet. Sci. Lett., 10, 81–86.
Senanayake W.E., McElhinny M.W. (1981). Hysteresis and susceptibility characteristics of magnetite and titanomagnetites: Interpretation of results from basaltic rocks, Phys. Earth Planet. Inter., 26, 47–55.
Shull C.E., Wallan E.O., Kochler W.C. (1951). Neutron scattering and polarization by ferromagnetic materials, Phys. Rev., 84, 912–921.
Smith G., Merrill R.T. (1982). The determination of the internal magnetic field in magnetic grains, J. Geophys. Res., 87, 9419–9423.
Stacey F.D. (1963). The physical theory of rock magnetism, Adv. Phys., 12, 45–133.
Stacey F.D., Banerjee S.K., 1974. The Physical Principles of Rock Magnetism, Elsevier, Amsterdam.
Stephenson A. (1970). Single domain grain distributions method for the determination of single domain grain distributions, Phys. Earth Planet. Inter., 4, 353–360.
Stoner E.L., Wohlfarth E.P. (1948). A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys, Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A, 240, 599–642.
Sugiura N. (1980). Field dependence of blocking temperature of single-domain magnetite, Earth Planet. Sci. Lett., 46, 438–442.
Taylor R.M., Schwertmann U. (1974). Maghemite in soils and its origin. II. Maghemite synthesis at ambient temperatures and pH 7, Clay Miner., 10, 299–310.
Thompson R., Bloemendal J., Dearing J.A., Oldfield F., Rummery T.A., Stober J.C., Turner G.M. (1980). Environmental applications of magnetic measurements, Science, 207, 481–486.
Towe K.M., Moench T.T. (1981). Electron-optical characterization of bacterial magnetite, Earth Planet. Sci. Lett., 52, 213–220.
Verwey E.J.W., Haayman P.W. (1941). Electronic conductivity and transition point in magnetite, Physica, 8, 979–987.
Wasilewski P.J., (1973). Magnetic hysteresis in natural materials, Earth Planet. Sci. Lett., 20, 67–72.
York D. (1978). Magnetic blocking temperature, Earth Planet. Sci. Lett. 39, 94–97.

Глава 3

ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ЕГО ПРИРОДА, ИСТОРИЯ И ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ БИОЛОГИИ

Дюрвард Д. Скайлс[1]

1. Введение

1.1. Влияние геомагнитного поля на биологические объекты

Как установлено в последнее десятилетие, магнитные взаимодействия имеют существенное значение в физиологии и биологии живых организмов. Этот вывод следует из двух элементарных соображений: 1) атомы и ионы, из которых состоит организм, благодаря наличию у них магнитных моментов и электрических зарядов могут взаимодействовать с магнитным полем окружающей среды; 2) окружающая среда практически каждого организма характеризуется высокоупорядоченным и стабильным (относительно времени жизни организма) геомагнитным полем, содержащим как пространственную, так и временну́ю информацию, которая может быть важна для организма.

Значение этих соображений существенно возрастает, если учесть тот факт, что, по всей вероятности, геомагнитное поле уже существовало до возникновения жизни на Земле, так что вся или почти вся органическая эволюция происходила в присутствии геомагнитного поля. Более того, за исключением коротких периодов времени, охватывающих инверсии магнитного поля, его конфигурация и напряженность почти не отличались от современных. Поэтому было бы удивительно, если бы в животном мире отсутствовали виды, способные обнаруживать магнитное поле и использовать это преимущество в борьбе за существование.

В последнее время было убедительно доказано, что у различных организмов – от бактерий до позвоночных – выявляются поведенческие реакции на изменения геомагнитного поля или лабораторных полей, сравнимых с ним по величине. Это свидетельствует о том, что геомагнитное поле и воспринимается этими организмами, и является существенным компонентом их среды обитания. Некоторые из изученных организмов, так же как и другие, которые еще предстоит исследовать в отношении способности к магниторецепции, содержат микроскопические частицы магнетита, по-видимому, связанные с нерв-

[1] *Durward Skiles*. Seismographic Station, University of California, Berkeley, California

ными клетками (например, Zoeger et al., 1981; Kuterbach et al., 1982). Открытие этого факта указывает на то, что скоро можно будет идентифицировать органы, обладающие магнитной рецепцией. Такого рода идентификация установила бы существование прямой магниторецепции организма в отличие от косвенной, осуществляемой через посредство наведенных электрических полей и органов, обладающих электрической рецепцией. Прямые, несенсорные реакции на магнитные поля уже привлекались для объяснения поведения магнитотаксических бактерий. Френкель и др. (Frankel et al., 1979) подсчитали, что вращающий момент, действующий на магнитотаксическую бактерию, достаточен для ориентации ее в геомагнитном поле.

В настоящее время стало ясно, что независимо от того, каким именно образом осуществляется магниторецепция, геомагнитное поле следует рассматривать как фактор окружающей среды, имеющий потенциальную значимость для разных таксономических групп. Ниже перечисляются некоторые из наиболее очевидных путей взаимодействия организма с геомагнитным полем. Относительная устойчивость поля в экологическом (в отличие от эволюционного) масштабе времени в сочетании с его географической аксиальной и экваториальной симметрией создают условия для ориентации и навигации. Кроме того, поле испытывает возмущения из-за локальных и региональных изменений в литологии и топографии. Поэтому такие формы рельефа, как горы, острова, побережья и некоторые локальные области спокойного рельефа, можно опознать по особенностям магнитного поля.

Поскольку на электрические токи в ионосфере влияют как солнечное излучение, так и солнечные и лунные приливные силы, магнитное поле на земной поверхности испытывает малоамплитудные вариации с периодами, равными солнечным и лунным суткам, синодическому месяцу и тропическому году. Любая из этих периодических вариаций может действовать как синхронизатор для биологических часов или давать возможность достаточно чувствительным организмам отмечать ход времени.

Наблюдавшиеся в ряде случаев магнитные предвестники землетрясений навели на мысль о том, что с их помощью можно объяснить некоторые сообщения о необычном поведении животных перед землетрясением. Этот умозрительный вывод с легкостью распространяют и на другие катастрофические геофизические явления, скажем ураганы или извержения вулканов.

И, наконец, было выдвинуто предположение, что во время инверсии геомагнитного поля скорости вымирания и видообразования должны увеличиваться в том случае, если уменьшение напряженности поля приводит к изменениям климата или возрастанию потока высокоэнергетических частиц и радиации на земной поверхности. Действительно, в глубоководных колонках осадочных отложений наблюдалась приближенная корреляция между инверсиями поля в течение последних нескольких миллионов лет и появлением и исчезновением некоторых

видов планктона. Альтернативное объяснение может состоять в том, что как инверсии поля, так и изменения фауны обусловлены третьим явлением, таким как удар метеорита. К этому теперь можно добавить, что вымирание или видообразование могли бы происходить в случаях, когда популяции, зависящие от временной или пространственной информации, получаемой через геомагнитное поле, были лишены ее на протяжении многих поколений во время инверсии.

Справедливость упомянутых предположений определяет будущие биомагнитные исследования. Задачей этой главы является описание геомагнитного поля как в геологическом прошлом, так и в наши дни. Чтобы помочь читателю лучше понять связь данного геомагнитного явления с конкретной биологической ситуацией, основное внимание мы будем уделять феноменологии. Некоторые теоретические и методологические сведения будут приведены в этой главе для того, чтобы читатель смог оценить, насколько хорошо мы понимаем различные геомагнитные явления. Поскольку объем главы не позволяет рассмотреть все имеющиеся данные, мы рекомендуем несколько книг по геомагнетизму, содержащих дополнительную практически важную информацию, в частности, Chapman, Bartels, 1940; Matsushita, Campbell, 1967; McElhinny, 1973 и Merrill, McElhinny, 1983. Однако для критического изучения проблемы биомагнетизма читателю нужно обратиться к оригинальной литературе по геомагнитному полю. Следует отметить, что многие из представленных здесь графиков, диаграмм и карт были построены в первую очередь для геофизиков с целью помочь в понимании природы геомагнитных явлений и потому являются идеализированными изображениями существенно упрощенных данных, которые часто значительно отличаются от того, что реально воздействует на магниточувствительный организм.

1.2. Электрические и магнитные поля: основные положения

Одной из главных целей биомагнитных исследований является выяснение природы биологических магниторецепторов. Как следует из названия этого тома, основное внимание исследователей в настоящее время сосредоточено на биогенных материалах, которые могут обладать постоянной или индуцированной намагниченностью. Однако с теоретической точки зрения нужно рассмотреть и другие материалы. Поскольку на движение любого электрического заряда влияют магнитные поля, в качестве потенциальных механизмов магниторецепции следует рассматривать ионные и электронные токи, имеющиеся внутри организмов. Помимо этого биомагнитные исследования должны включать в себя изучение электрорецепции, поскольку магнитное поле, направление или величина которого меняется во времени, всегда сопровождается электрическим полем (закон Фарадея), и организм, движущийся в магнитном

поле, «видит» электрическое поле, так же как и магнитное. Следовательно, если организм проявляет поведенческую или физиологическую реакцию на магнитное поле, необходимо выяснить, реагирует ли он на магнитное поле прямо через магниторецептор или косвенно через электрическое поле. В свете доказанных электросенсорных способностей различных организмов (см., например Kalmijn, 1974) это приобретает особое значение. Строго говоря, аналогичная проблема существует при рассмотрении реакций организмов на электрические поля. Однако если учитывать только небольшие низкочастотные медленно меняющиеся электрические поля, свойственные естественному окружению биологических систем, то окажется, что магнитные поля, связанные с временными изменениями электрических полей, обычно чрезвычайно слабы. Исключение составляют такие лабораторные условия, когда организм подвергается воздействию импульсных электрических полей. В подобных случаях низкочастотное приближение нарушается (даже если число пульсаций в единицу времени мало) внезапными включениями и выключениями электрического поля, что может приводить к возникновению значительных магнитных полей.

Поскольку понимание фундаментальной взаимосвязи между электрическими и магнитными полями существенно для правильной интерпретации биологических реакций на воздействие геомагнитного поля, рассмотрим некоторые основные представления. Первое и самое главное из них заключается в том, что электрические и магнитные поля связаны друг с другом. Они являются компонентами одного и того же электромагнитного поля, пространственные и временные характеристики которого будут казаться различными двум или нескольким наблюдателям, движущимся относительно друг друга. Поэтому важно, чтобы каждый наблюдатель измерял все физические величины приборами, располагающимися в его собственной системе отсчета, т.е. приборами, неподвижными по отношению к нему.

Электромагнитная сила $\mathbf{F}_q$, которая действует на заряд q, движущийся со скоростью $\mathbf{v}$ в электрическом поле $\mathbf{E}$ и магнитном поле $\mathbf{B}$, равна:

$$\mathbf{F}_q = q(\mathbf{E} + k\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \tag{1}$$

где крестик означает векторное произведение, k – постоянная, зависящая от используемой системы единиц. В электромагнитной (СГСМ) и электростатической (СГСЭ) системах, а также в системе МКС $k = 1$, а в системе СГС $k = 1/c$. Таким образом, электрическая сила, действующая на q, коллинеарна $\mathbf{E}$, а магнитная, или сила Лоренца, перпендикулярна как $\mathbf{v}$, так и $\mathbf{B}$. Уравнение (1) справедливо для всех наблюдателей независимо от их относительных движений. Однако величины и направления векторов $\mathbf{F}_q$, $\mathbf{E}$, $\mathbf{v}$ и $\mathbf{B}$ будут в общем случае различны для разных наблюдателей. Из-за инвариантности заряда q является одним и тем же для всех наблюдателей, и изменение знака q меняет на противоположное направление силы $\mathbf{F}_q$. Для биологически значимых скоростей разница в $\mathbf{F}_q$ и $\mathbf{B}$ в случае разных наблюдателей пренебрежимо мала.

Чтобы понять, почему наблюдатель, движущийся в магнитном поле, «видит» электрическое поле, посмотрим, что происходит с электрическим зарядом q, движущимся параллельно длинному прямому проводнику. Исследуем этот вопрос для двух случаев – во-первых, с точки зрения наблюдателя, неподвижного по отношению к проводу (рис. 3.1, *А*), а во-вторых, с точки зрения наблюдателя, неподвижного по отношению к заряду (рис. 3.1, *Б*). Поскольку известно, что все электрические поля создаются электрическими зарядами, а все магнитные поля возникают как следствие электрических токов, эта проблема равносильна сравнению электрических и магнитных полей, воздействующих на сидящего на насесте голубя, и полей, которым подвергается голубь, улетающий с насеста.

Рассмотрим голубя на насесте, который видит неподвижный провод, по которому течет ток $\mathbf{I}$ справа налево, как показано на рис. 3.1, *А*. Провод незаряжен, так что электрическое поле вокруг него отсутствует ($\mathbf{E} = 0$). Ток $\mathbf{I}$ создает магнитное поле $\mathbf{B}$, силовые линии которого закручиваются вокруг провода по часовой стрелке, если смотреть по направлению тока. (Магнитная силовая линия – это кривая, направление которой в каждой точке определяет направление вектора магнитного поля в этой точке.)

Поместим вблизи провода отрицательный заряд q, который движется со скоростью $\mathbf{v}_q$ параллельно проводу (рис. 3.1, *А*). Неподвижный голубь не обнаружит электрической силы, действующей на заряд, но «почувствует» магнитную силу $q\mathbf{v}_q \times \mathbf{B}$, направленную к проводу. Рассмотрим теперь второго голубя, летящего вместе с зарядом q. Такой голубь также обнаружит магнитное поле $\mathbf{B}$, но не заметит магнитной силы, действующей на q, потому что заряд q по отношению к нему покоится (рис. 3.1, *Б*). Однако оба голубя «увидят», что заряд q испытывает ускорение, направленное к проводу. Следовательно, летящему

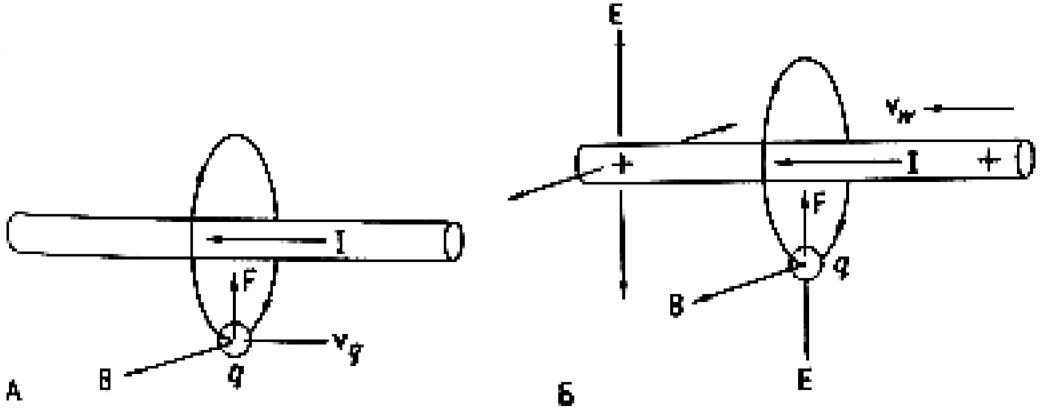


Рис. 3.1. Сила, действующая на отрицательный заряд q вблизи проводника, в котором течет ток $\mathbf{I}$, создающий магнитное поле $\mathbf{B}$. *А*. Проводник неподвижен относительно наблюдателя, а q движется со скоростью $\mathbf{v}_q$. *Б*. Заряд q неподвижен относительно наблюдателя, а проводник движется со скоростью $\mathbf{v}_w = -\mathbf{v}_q$.

голубю провод покажется положительно заряженным и создающим электрическое поле $\mathbf{E} = \mathbf{v}_q \times \mathbf{B}$, которое притягивает отрицательный заряд q к проводу. Почему провод заряжен? Ответ весьма прост. Электрические токи должны образовывать замкнутые петли, так что проводник на рис. 3.1 должен быть частью большого замкнутого контура. Для летящего голубя провод около q движется со скоростью $\mathbf{v}_w = -\mathbf{v}_q$ в магнитном поле, создаваемом током удаленной части контура. В действительности каждая часть контура движется в магнитном поле, создаваемом током на противоположной его стороне. Результирующие магнитные силы, которые действуют на заряды, присутствующие в проводе, приведут к тому, что положительные заряды соберутся в проводе около q, а отрицательные – в проводе на удаленной стороне контура.

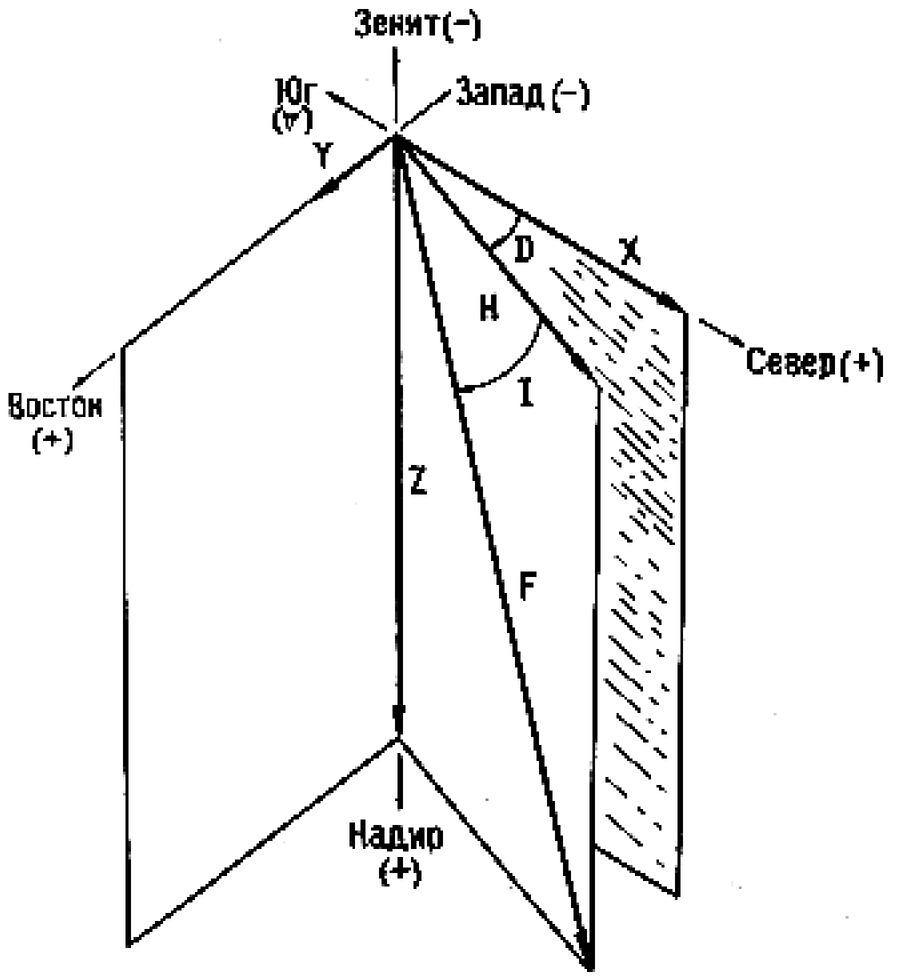
Некоторые читатели могут не согласиться с точкой зрения летящего голубя. Поскольку движущийся контур переносит свое магнитное поле с собой, здесь не происходит относительного движения магнитных силовых линий и зарядов в проводе. Следовательно, «заключение» голубя о том, что на заряд q действует электрическое поле со стороны положительно заряженного провода, неверно. В действительности происходит следующее: движение магнитных силовых линий по отношению к q приводит к появлению силы, действующей на этот заряд. Однако экспериментально такой ход рассуждений не подтверждается. Если каждого голубя снабдить прибором, измеряющим электрическое поле, у летящего голубя стрелка на приборе отклонится, а у покоящегося останется неподвижной. «Воображаемое» электрическое поле летящего голубя оказывается вполне реальным.

Наши сомневающиеся читатели просто не поняли уравнения (1). Скорость $\mathbf{v}_q$ есть скорость движения заряда q относительно данного наблюдателя, а $\mathbf{B}$ и $\mathbf{E}$ – это просто поля, измеренные на заряде q приборами, находящимися в покое по отношению к этому наблюдателю. Здесь ничего не говорится и не утверждается о движении полей или их источников. В самом деле, в электродинамике нельзя определить «движущуюся силовую линию» однозначно. Например, хотя летящий голубь «видит» силовые линии электрического поля, неподвижный голубь не «видит» тех же самых силовых линий, движущихся относительно него со скоростью $-\mathbf{v}_q$. Действительно, сидящий голубь вовсе не «видит» силовых линий ($\mathbf{E} = 0$). Красота рассмотрения электромагнетизма с позиций теории поля состоит в том, что данный наблюдатель может ничего не знать о движении или других свойствах контура, создающего электромагнитное поле. Наблюдатель должен только измерить поля и применить уравнение (1). Для детального анализа электрических полей, действие которых испытывают движущиеся и покоящиеся организмы, читатель может обратиться к работе Kalmijn, 1974.

2. Главное геомагнитное поле

2.1. Природа современного поля

Примитивный магнитный компас был наверняка известен китайцам уже во II в. до н.э. (Needham, 1962), и с этого времени человечество широко использовало тот факт, что на большей части земной поверхности стрелка компаса указывает приблизительно на географический Северный полюс. В самом деле, если взять сферический компас, стрелка которого может свободно смещаться как по горизонтали, так и по вертикали, то около Аддис-Абебы (Эфиопия) она установится в горизонтальной плоскости, а ее северный конец будет указывать прямо



D-склонение
H-горизонтальная составляющая
Z-вертикальная составляющая
X-меридиональная компонента
Y-широтная компонента
F-полный вектор напряженности
I-наклонение

Рис. 3.2. Полный вектор напряженности геомагнитного поля F и географическая ориентация магнитных элементов *D*, *I*, *H*, *X*, *Y* и *Z* (Chernosky et al., 1965).

на географический север. Однако окрестности Аддис-Абебы – лишь один из трех-четырех районов мира, где компас будет ориентирован с такой точностью. Как правило, направление стрелки будет меняться от места к месту, отклоняясь на несколько градусов от истинного севера и горизонтали.

Поэтому полезно выбирать географически обоснованную систему координат, в которой можно подходящим образом определить величину и направление вектора геомагнитного поля в любой точке. (В заданной точке вектор магнитного поля направлен туда же, куда направлен северный конец стрелки сферического компаса.) Общепринятой является прямоугольная система координат, у которой оси направлены на север, восток и вниз (рис. 3.2). Вектор магнитного поля, который в литературе по геомагнетизму обычно обозначается **F** или T, а не **B**, можно затем разложить на декартовы компоненты, обозначаемые X (северная), Y (восточная) и Z (вертикальная). Компонента поля, расположенная в горизонтальной плоскости, представляет собой горизонтальную напряженность H, которая ориентирована по направлению стрелки обычного морского или географического компаса. Угол между **H** и направлением на истинный север называется *магнитным склонением D*, которое считается положительным (отрицательным), когда **H** направлено на восток (запад) относительно направления на север. *Наклонение I* – это угол между **F** и **H**; оно положительно (отрицательно), когда **F** направлено вниз (вверх) от горизонтальной плоскости. Эти *элементы магнитного поля* связаны между собой уравнениями

$$F = T = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2} = (H^2 + Z^2)^{1/2}, \tag{2}$$

$$X = H\cos D, \quad Y = H\sin D, \quad Z = F\sin I, \tag{3}$$

$$H = F\cos I, \tag{4}$$

где H – абсолютная величина горизонтальной составляющей, а $F = T$ – величина полного вектора магнитного поля. Таким образом, величина и направление вектора **F** однозначно определяются любыми тремя независимыми элементами, например (X, Y, Z), (F, I, D) или (H, Z, D).

В системе МКС напряженность магнитного поля **B** (в литературе по физике обычно называемая магнитной индукцией) традиционно выражалась в Н/(А·м) или в Вб/м². В последние годы единица Вб/м² была переименована в теслу (Тл). В гауссовой системе (системе СГС) единицей магнитной индукции является гаусс (Гс). В литературе по гео- и биомагнетизму часто встречается единица, называемая эрстед (Э) и представляющая собой единицу измерения напряженности магнитного поля в системе СГС (ее не следует путать с горизонтальной составляющей H геомагнитного поля), которая в системе МКС эквивалентна А/м. Однако для всех практических приложений эрстед и гаусс численно равны. При измерениях очень слабых магнитных полей используются нанотесла (нТл) в системе МКС и гамма (γ) в СГС. Эти единицы магнитной индукции связаны между собой следующими соотношениями:

$$1\ \text{Гс} = 10^{-4}\ \text{Тл} = 10^{-4}\ \text{Вб/м}^2,$$

$$1\gamma = 10^{-5}\ \text{Гс} = 10^{-9}\ \text{Тл} = 1\ \text{нТл}.$$

Индукция геомагнитного поля на поверхности Земли изменяется примерно от 0,24 Гс в районе Рио-де-Жанейро (Бразилия) до 0,61–0,68 Гс вблизи географических полюсов. По лабораторным стандартам это поле довольно слабое. Постоянные поля до 100 000 Гс легко создаются в лабораторных условиях, а магнитное поле вблизи игрушечного магнита имеет порядок 100 Гс. С другой стороны, Виксво и др. (Wikswo et al., 1980) обнаружили поле в 0,12 нТл, созданное потенциалом действия изолированного седалищного нерва лягушки-быка. Последняя величина представляет интерес, поскольку она позволяет оценить уровень шума внутри организма. Чтобы внешние поля можно было обнаружить биологическим путем, они должны превышать уровень шума.

Одной из главных задач прикладного геомагнетизма является построение карт элементов магнитного поля. Магнитные исследования проводились мореплавателями начиная по крайней мере с 1500-х годов, но серьезные мировые магнитные съемки стали проводиться лишь с начала нашего века. Первоначально измеряли только склонения и наклонения, поскольку надежные измерения напряженности магнитного поля оказались возможны только после теоретических и технологических достижений XIX в. В настоящее время магнитное поле непрерывно изучают с помощью наземных, морских, воздушных и спутниковых измерений. При этом наиболее точные измерения проводятся на глобальной сети, состоящей из 100 размещенных по всему миру постоянных наземных магнитных обсерваторий. Таким образом, детальная информация о структуре и поведении поля получена примерно за последние 80 лет. Выводы о глобальном распределении поля до этого времени приходится делать, исходя из крайне отрывочных данных, используя приложенный к геомагнетизму принцип униформизма, известный как «гипотеза осевого геоцентрического диполя».

Изучение магнитного поля достигло кульминации в период *Мировой магнитной съемки*, проведенной учеными разных стран. В результате были собраны данные с 1961 по 1967 г. и построено Международное эталонное геомагнитное поле (МЭГП) для эпохи 1965.0. На рис. 3.3–3.5 показаны карты элементов F, D и I, полученные для эпохи 1965 с использованием МЭГП[1]. Более детальный анализ вывода МЭГП для эпохи 1965 приводится в работе Zmuda, 1971.

Используя представленные ниже карты, сделаем несколько замечаний о характере поля. Над большей частью Северного полушария линии поля направлены вниз ($I > 0$). Над большей частью Южного полушария они направлены вверх ($I < 0$) (см. также рис. 3.13). Линии равных

[1] Намного более детальные карты опубликованы Океанографическим управлением ВМС США.

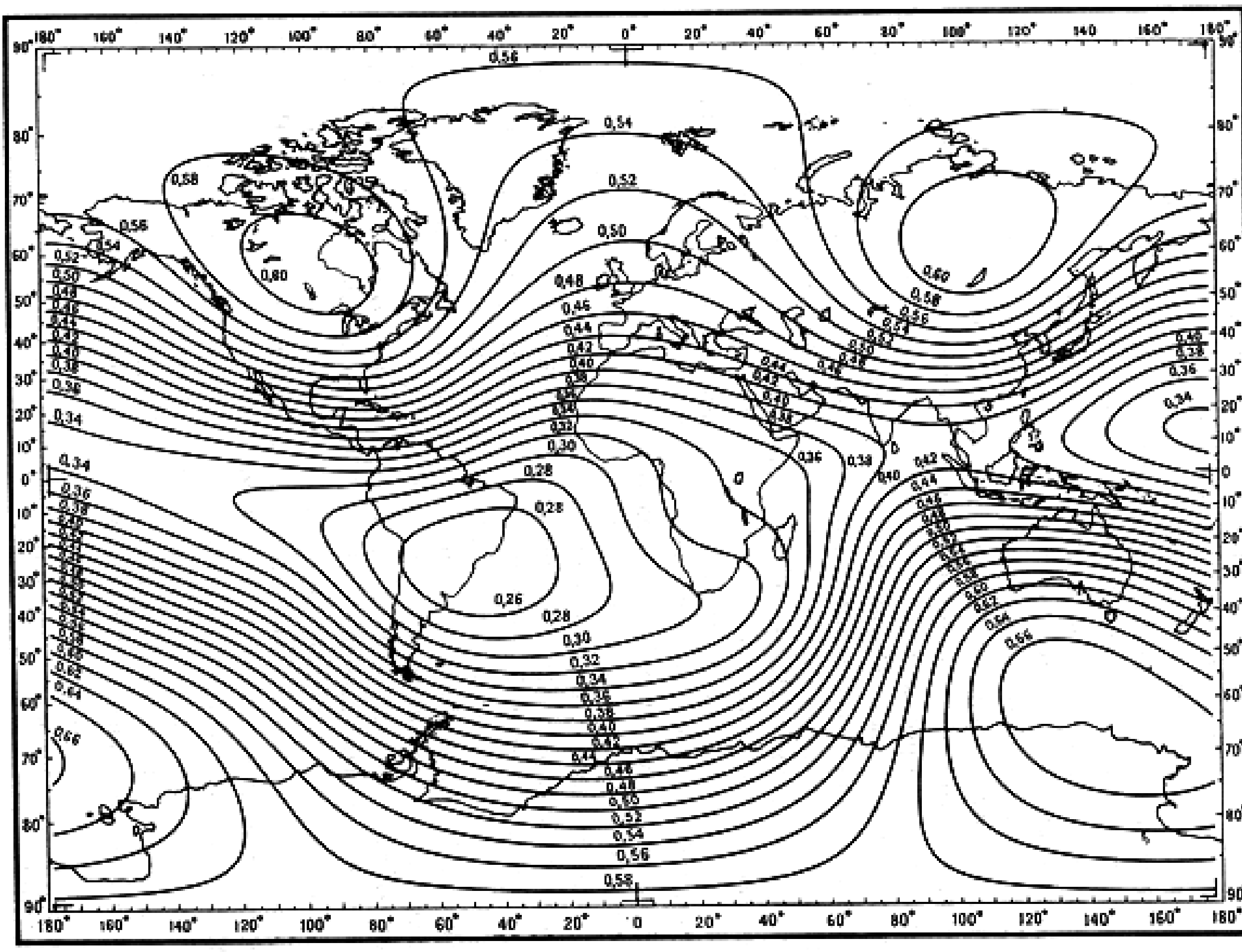


Рис. 3.3. Полный вектор напряженности геомагнитного поля (Гс) для МЭГП эпохи 1965.0 (Zmuda, 197

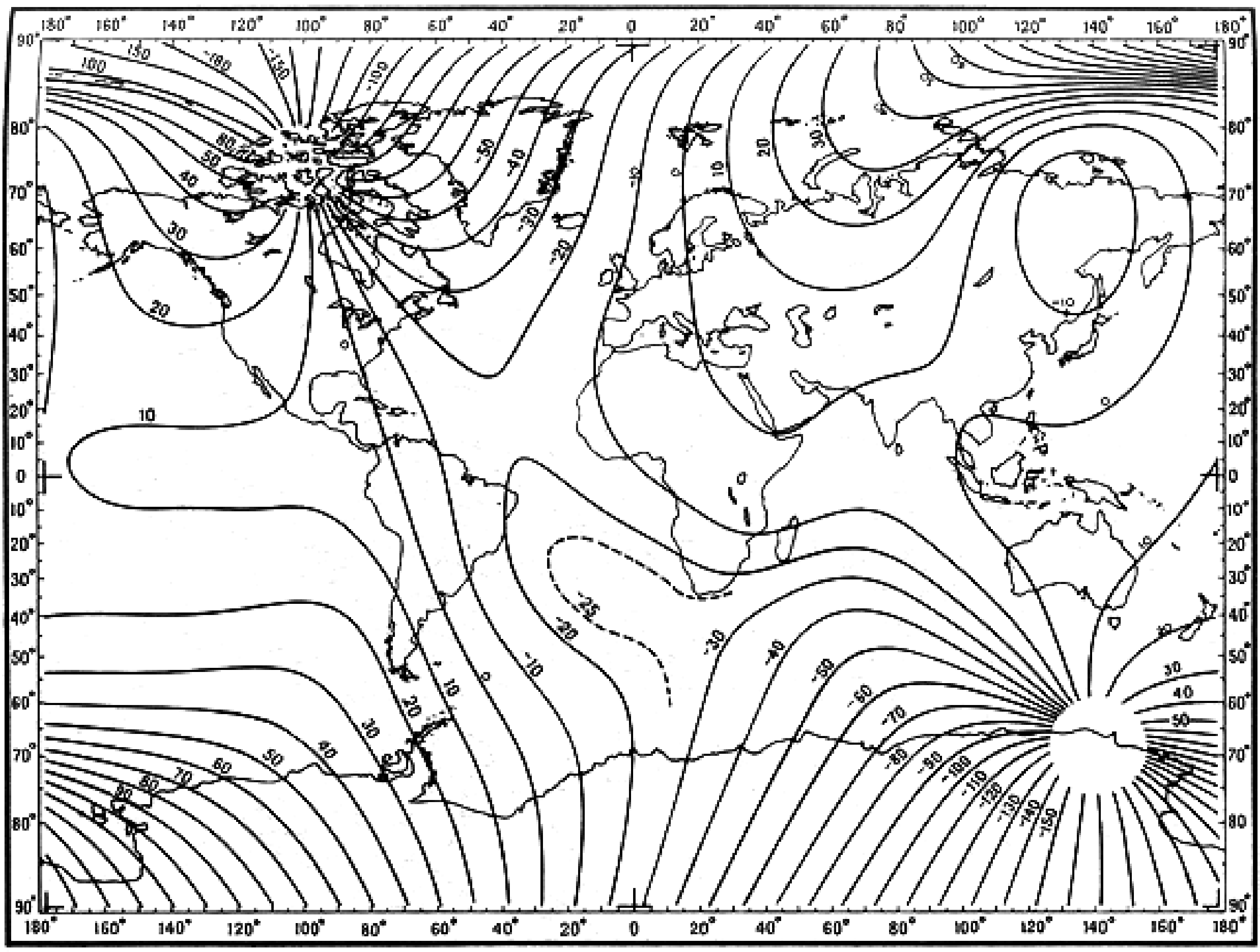


Рис. 3.4. Магнитное склонение для МЭГП эпохи 1965.0 (Zmuda, 1971).

наклонений называются *изоклинами* или *магнитными широтами*. Изоклина, опоясывающая Землю, для которой $I = 0$, называется *магнитным экватором*, а точка, в которой $I = +90°$ ($I = -90°$), называется *северным (южным) магнитным полюсом*. Заметим, что магнитные полюса не совпадают с географическими и не являются антиподами. Для поля эпохи 1965 северный магнитный полюс располагался в пределах Северного полярного круга на острове Батерст (Канада) приблизительно в точке с координатами 75,5° с. ш., 101° з. д., тогда как южный сразу за Южным полярным кругом на Земле Адели (Антарктида) примерно в районе 65,5° ю. ш., 140,3° в. д.

Совершенно ясно, что геомагнитное поле содержит значительную ориентационную и навигационную информацию. Линии равной напряженности поля, называемые *изодинамами*, над большей частью поверхности Земли простираются в направлении восток–запад, что позволяет производить приближенное определение широты в каждом полушарии. По изоклинам можно еще точнее определять географическую широту, а изменение знака I на экваторе дает возможность провести границу между полушариями. При наличии магнитного компаса можно определить склонение в любой точке, что равносильно определению направления на географический север. Линии равного склонения, называемые *изогонами*, и изоклины образуют координатную сетку, аналогичную той, которую образуют географические параллели и меридианы. Отметим, что есть две линии нулевого магнитного склонения ($D = 0$) (см. рис. 3.4). В свете многочисленных исследований ориентации и миграции животных, которые проводились в Европе в течение последних нескольких десятилетий, интересно отметить, что одна линия нулевого магнитного склонения проходит через Центральную Европу почти точно в меридиональном направлении. За явным исключением Центральной Евразии и Южной Африки, над большей частью континентов и северных океанов изогоны проходят приблизительно с севера на юг, поэтому их можно использовать для определения географической долготы без помощи часов.

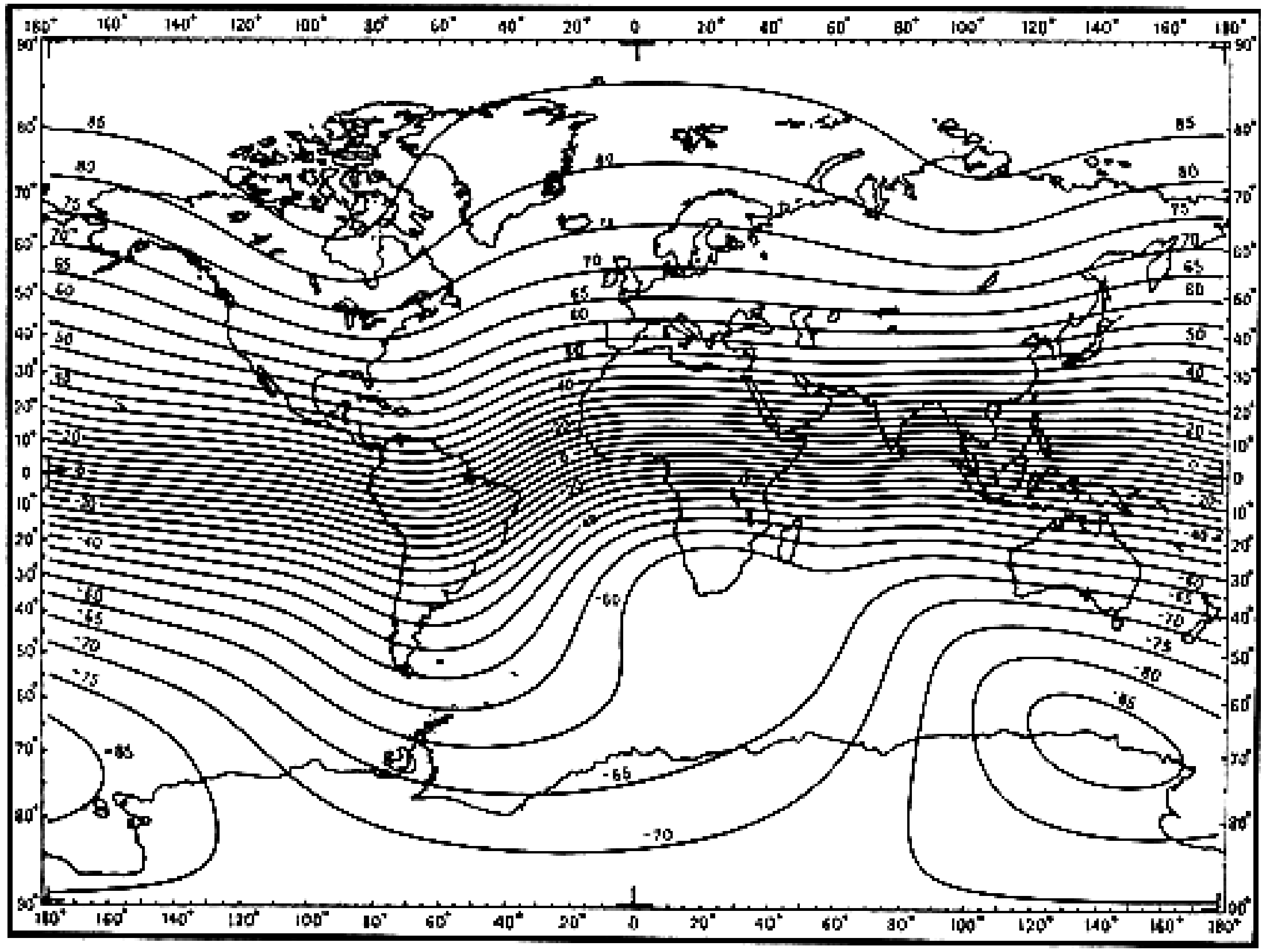


Рис. 3.5. Магнитное наклонение для МЭГП эпохи 1965.0 (Zmuda, 1971).

Построение карт магнитного поля – непростая задача. Как правило, данные должны быть отбракованы и взвешены с учетом их надежности. По данным спутниковых и аэромагнитных измерений нужно определить соответствующие значения на поверхности. Следует исключить локальные аномалии, связанные главным образом с геологическими структурами, расположенными в нескольких верхних километрах земной коры. Кроме того, значения геомагнитных элементов не постоянны во времени, а «дрейфуют» от года к году, испытывают периодические суточные, месячные и годовые вариации и время от времени возмущаются магнитными бурями. Возмущения необходимо исключить, периодические флуктуации – усреднить по определенным интервалам времени, а данные за несколько лет должны быть приведены к одному и тому же времени.

Дрейф значений магнитных элементов, известный под названием

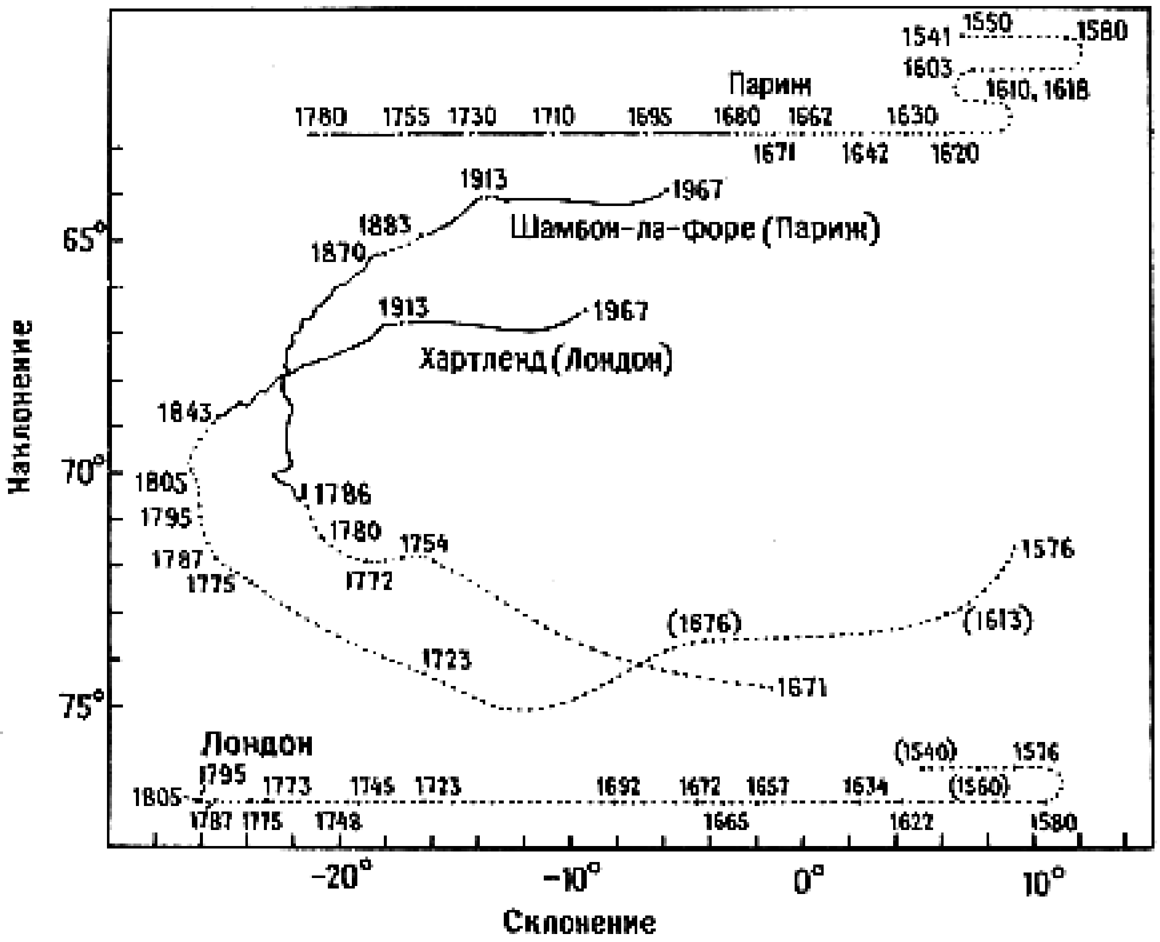


Рис. 3.6. Вековые вариации *D* и *I*, зарегистрированные вблизи Лондона и Парижа за последние 400 лет. Сплошные кривые построены в соответствии с постоянными записями, полученными на обсерваториях, а пунктирные – по историческим данным, предоставленным Гайбар-Пуэртасом (Gaibar-Puertas, 1953) (Skiles, 1970).

вековой вариации, происходит достаточно быстро, что требует ревизии геомагнитных карт каждые 5–10 лет. Классические примеры вековой вариации обнаружены в геомагнитных записях, полученных вблизи Лондона и Парижа в течение последних нескольких сотен лет (рис. 3.6). В этих районах склонение изменилось на 18°, а наклонение на 6° за 100 лет. Такие быстрые изменения поля по направлению явно имеют биологический смысл. Если способность ориентироваться относительно геомагнитного поля может быть генетически запрограммирована, то маловероятно, чтобы и абсолютное направление поля было заложено в эту программу. Последующие поколения должны научиться связывать направление геомагнитного поля с конкретным географическим направлением.

На рис. 3.7–3.9 приведены карты годовых вековых вариаций *F*, *D* и *I* для МЭГП эпохи 1965. Из анализа этих карт видно, что вековая вариация является глобальной характеристикой поля, и изменения *D* и *I* в районе Лондона и Парижа весьма типичны. Из характера кривых, показанных на рис. 3.6, также очевидно, что как скорость, так и знак

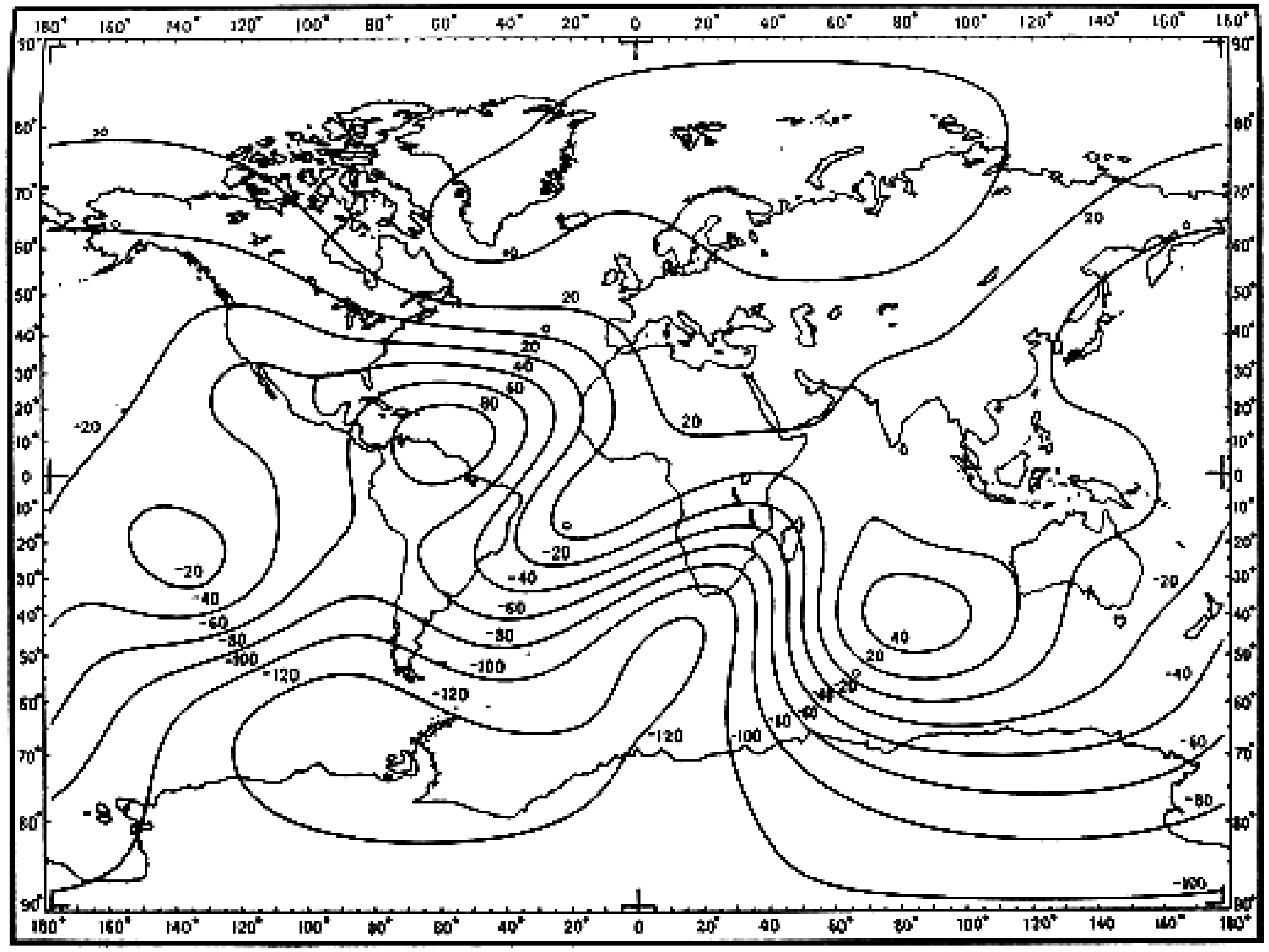


Рис. 3.7. Вековая вариация *F* (нТл/год) для МЭГП эпохи 1965.0 (Zmuda, 1971).

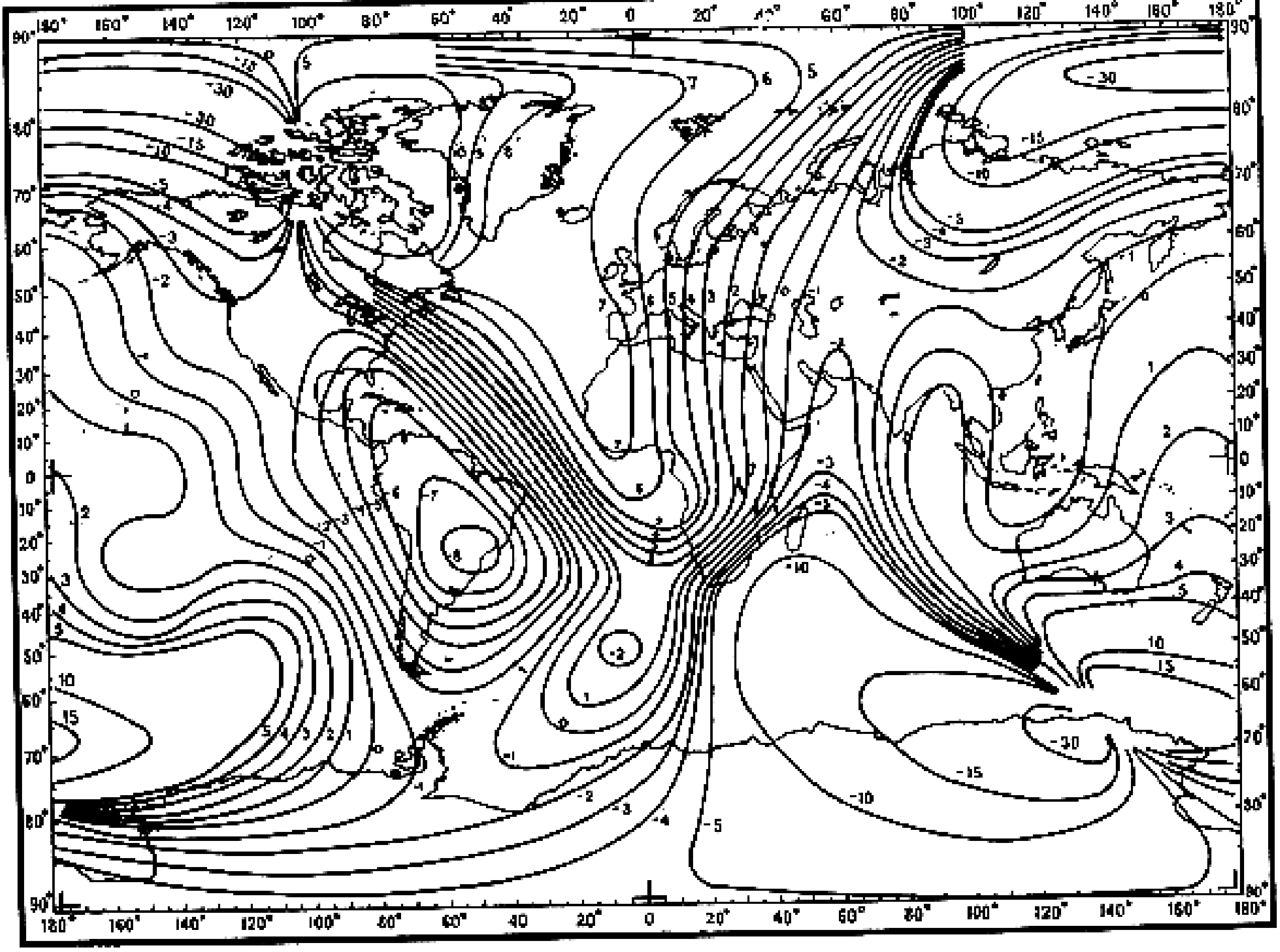


Рис. 3.8. Вековая вариация *D* (минуты дуги в год) для МЭГП эпохи 1965.0 (Zmuda, 1971).

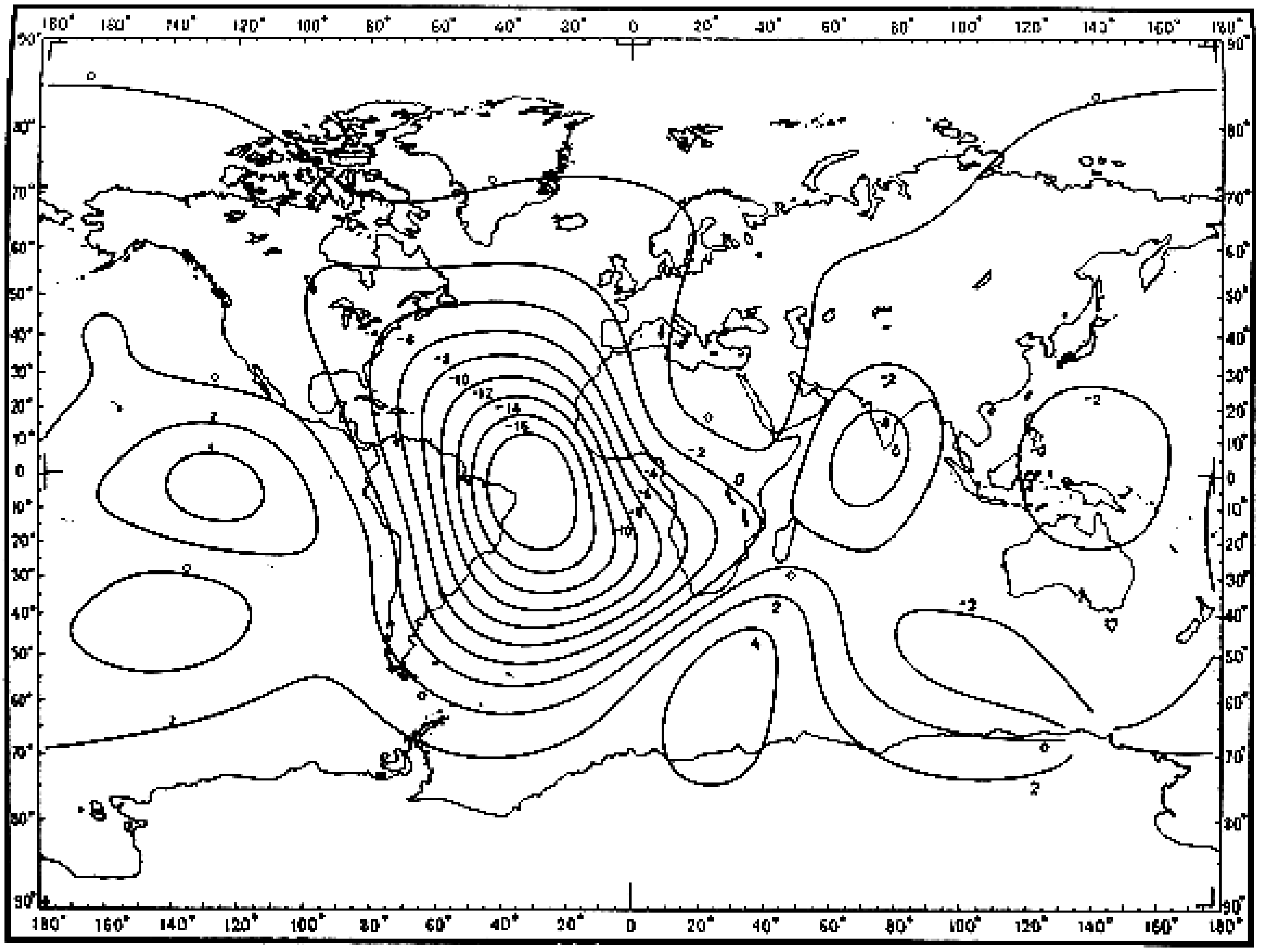


Рис. 3.9. Вековая вариация *I* (минуты дуги в год) для МЭГП эпохи 1965.0 (Zmuda, 1971).

вековой вариации меняются со временем. Таким образом, геомагнитное поле чрезвычайно динамично.

Поскольку геомагнитные элементы изменяются во времени, а число измерений, используемых для построения магнитных карт, неизбежно ограничено, геомагнитные карты не могут быть абсолютно точными для каждой точки земного шара. Но если пренебречь влиянием коровых аномалий, то эти карты окажутся в очень хорошем согласии с измеренными величинами. Кейн и Хендрикс (Cain, Hendriks, 1968) сравнили значения геомагнитных элементов D, H и Z, полученные по модели поля GSFC (12/66) (которая практически идентична МЭГП эпохи 1965), со среднегодовыми значениями для 1965 г., измеренными в стационарных магнитных обсерваториях. Они нашли, что значения D, как правило, совпадают в пределах нескольких минут, а H и Z часто совпадают в пределах нескольких десятков нанотесл и редко отличаются более чем на 100 нТл. Примерами худших случаев являются расхождения в 550 нТл (~ 2,5%) по H на острове Маврикий в Индийском океане и в 2° по D между значением, полученным по карте (2°) и измеренным в обсерватории Тромсё (Норвегия) (0°). Предполагается, что подобные расхождения связаны с локальными магнитными аномалиями, источники которых находятся в земной коре.

Конечно, при создании магнитных обсерваторий их располагают по возможности вдали от значительных коровых аномалий. Однако приведенные выше случаи расхождения являются далеко не худшими из тех, с которыми может встретиться исследователь. Аномалии, создаваемые некоторыми рудными телами, достаточно велики для того, чтобы магнитный компас в данном районе стал бесполезным. Так, например, Чепмен и Бартелс (Chapman, Bartels, 1940) заметили, что месторождение магнетита вблизи финского острова Юссаро увеличивает вертикальную компоненту поля на 0,63 Гс, и возникающее в результате возмущение

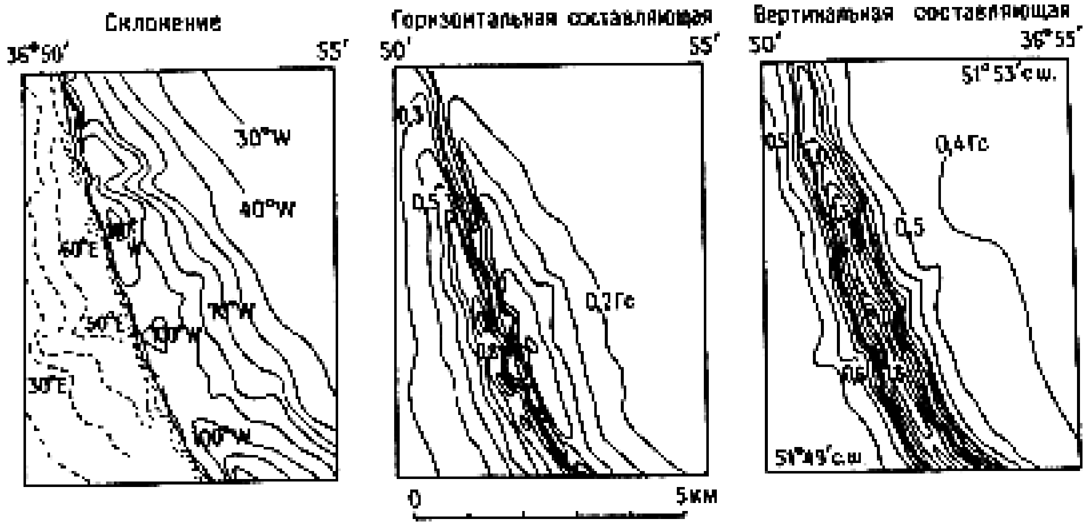


Рис. 3.10. Изомагнитные карты северной части Курской магнитной аномалии (Chapman, Bartels, 1940).

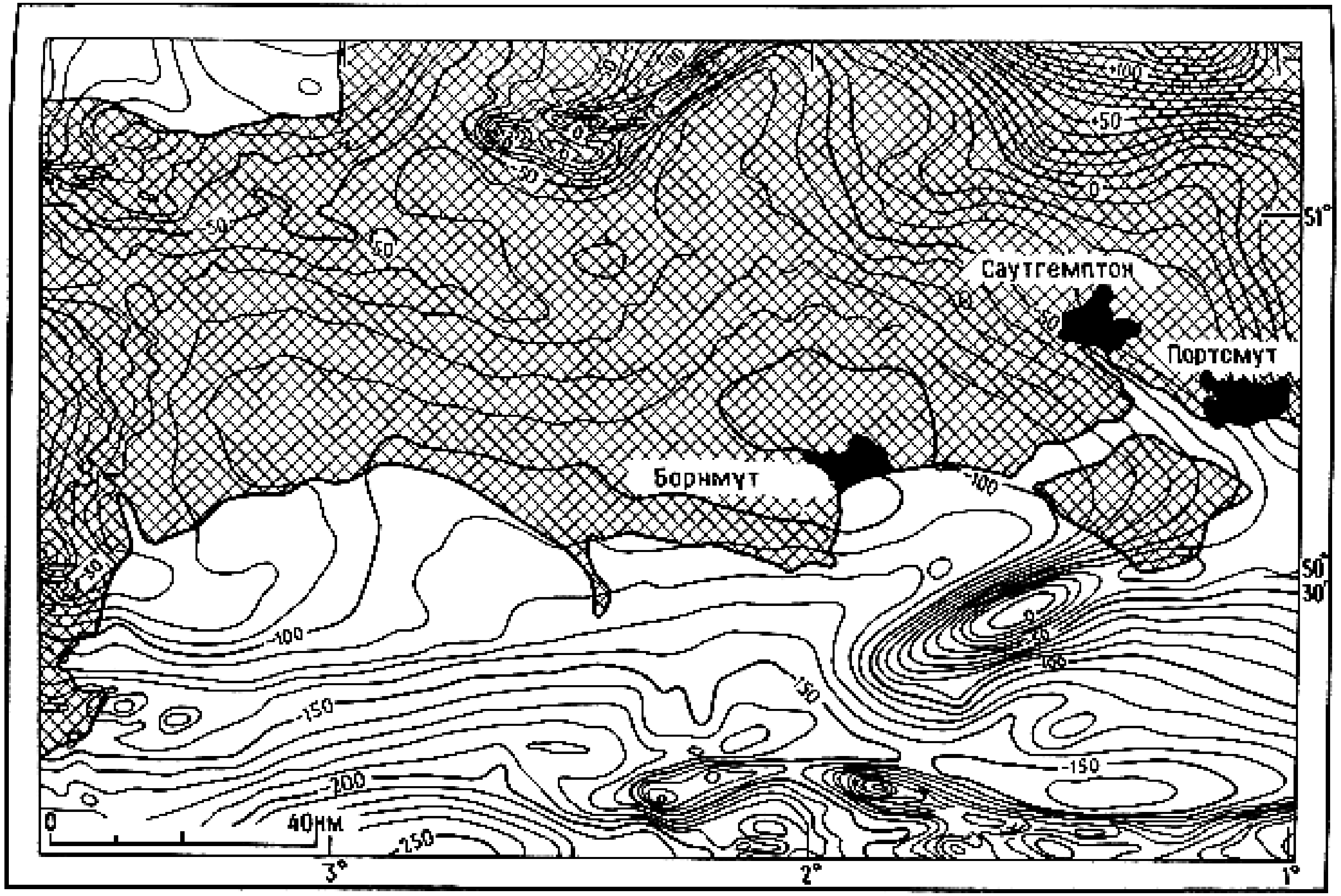


Рис. 3.11. Карта магнитных аномалий в районе Южного побережья Англии (Hahn, 1971).

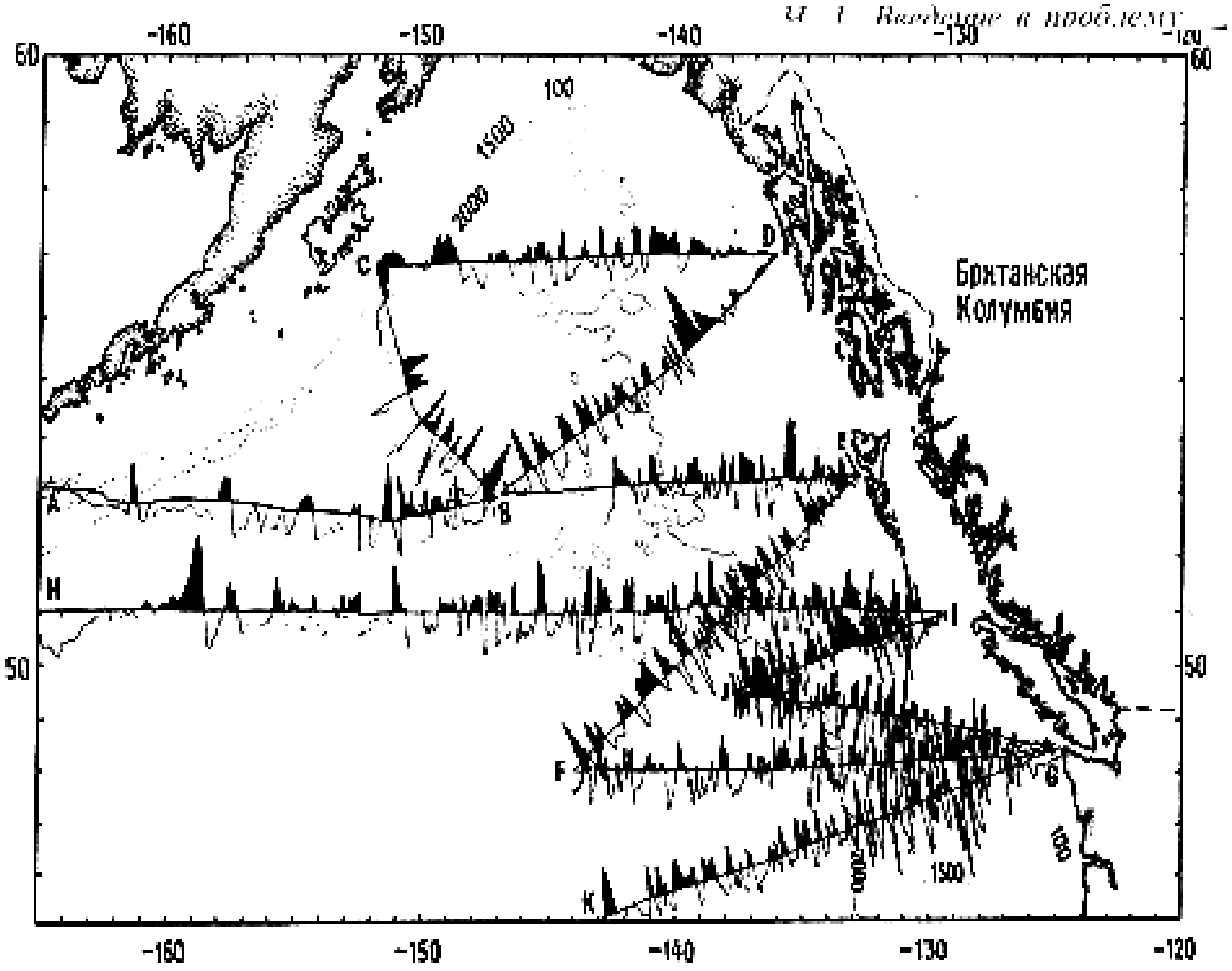


Рис. 3.12. Карта магнитных аномалий северо-восточной части Тихого океана, построенных вдоль маршрутных профилей. Черные участки соответствуют положительным аномалиям. Амплитуда большой положительной аномалии, расположенной вблизи левого конца профиля HI, составляет приблизительно 1500 нТл (Pitman, Hayes, 1968).

значений D явилось причиной многих кораблекрушений. Одна из наиболее крупных мировых аномалий отмечена в Лапландии, где Z возрастает до 3,6 Гс. Знаменитая Курская магнитная аномалия, расположенная примерно в 450 км к югу от Москвы, состоит из двух узких структур длиной порядка 250 км, находящихся на расстоянии 60 км друг от друга. D изменяется здесь от $+60$ до $-110°$, а максимальная величина аномалии Z достигает 1,9 Гс (рис. 3.10).

Магнитные аномалии обусловлены остаточной и индуцированной естественной намагниченностью горных пород. Величина аномалии зависит от размеров и формы вызвавшего ее тела, глубины залегания его от поверхности земли и содержания в нем магнитных минералов. Благодаря присутствию в горных породах магнитных минералов практически каждого типа масштаб величин магнитных аномалий варьирует от только что описанных очень больших, но редко встречающихся до слабых аномалий (100–1000 нТл), которые охватывают всю Землю. На рис. 3.11 приведен характерный пример магнитной «топографии», полученный в результате аэромагнитной съемки. Обычно такого рода съемки проводятся на высотах примерно от нескольких сотен до 1000 м. На поверхности распределение магнитных аномалий будет казаться более резким и сложным. На рис. 3.12 можно видеть величину аномалий, зарегистрированных при морской съемке в заливе Аляска. Часто превышающие 1000 нТл аномалии являются типичным фоновым шумом, с которым может неожиданно встретиться мигрирующая рыба или птица. Уолкотт (Walcott, 1978) заметил, что ориентация домашних голубей нарушается вблизи немного более интенсивных, но характеризующихся более резким градиентом аномалий (3000–4000 нТл на 3 км). Однако такие аномалии могли бы оказаться полезными большому количеству видов, которые смогли бы научиться распознавать конкретный район по особенностям его магнитного поля.

Широкое распространение магнитных аномалий имеет очевидные следствия для биомагнитных исследований. Если исследователю необходимо точно знать геомагнитное поле в заданном районе, то он не может полагаться на карты глобального поля. По возможности следует измерить поле в интересующей его точке. Если это невозможно, то нужно обратиться к картам локального магнитного поля, из которых аномалии не были исключены.

2.2. Дипольная конфигурация поля

Поскольку изолированные магнитные заряды (монополи) не существуют (либо так редки или неуловимы, что не могут быть обнаружены), простейшей формой магнитного поля является поле диполя, наиболее известным примером которого служит поле магнитного стержня. Довольно хорошим приближением к конфигурации современного геомагнитного поля является поле *осевого геоцентрического диполя*, помещенного в центр Земли и ориентированного вдоль оси вращения

Земли. Лучшая аппроксимация достигается в том случае, если ось диполя наклонена на 11° относительно географической оси в направлении меридиана 70° з. д. (рис. 3.13). Самая лучшая аппроксимация достигается, когда наклоненный диполь смещен от центра Земли на несколько сотен километров. Однако как физическая реальность источник диполя не существует. Это только наиболее легкий путь визуального представления общей конфигурации геомагнитного поля.

Для аналитических целей удобнее всего иметь дело со строго геоцентрическим диполем, поскольку такой диполь создает высокосимметричное поле на поверхности Земли. Наиболее удовлетворяющий наблюдаемому полю центральный диполь определяется следующим образом. В такой области, как земная атмосфера около поверхности Земли, где отсутствуют электрические токи или намагниченное вещество, магнитное поле удовлетворяет уравнению

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0 \tag{5}$$

и выводится из потенциала V:

$$\mathbf{B} = -\nabla V. \tag{6}$$

Поскольку магнитные монополи не существуют,

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{7}$$

и магнитный потенциал удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\nabla^2 V = 0. \tag{8}$$

В сферической системе координат, где r – расстояние от источника, θ – дополнение до широты (коширота) и Φ – долгота, решение уравнения

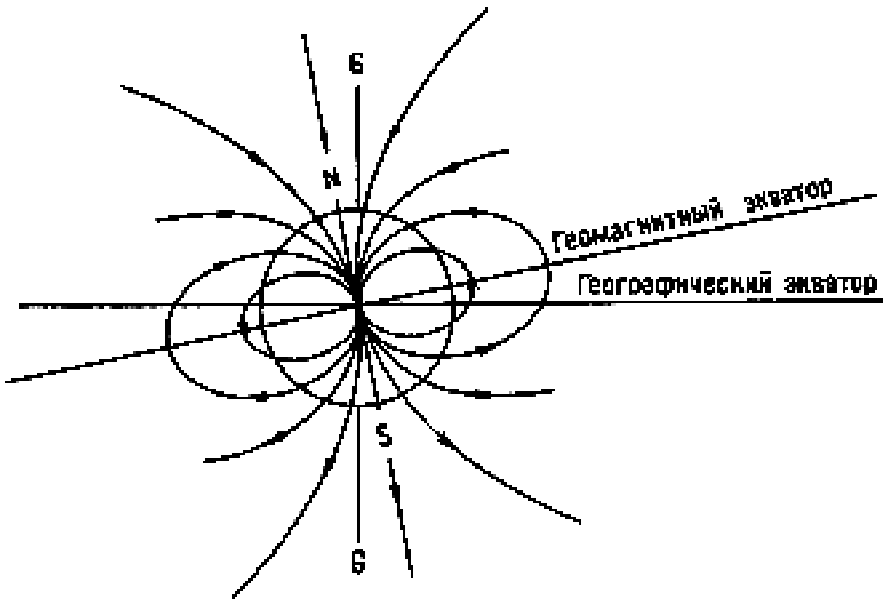


Рис. 3.13. Магнитные силовые линии наклоненного геоцентрического диполя. N – северный геомагнитный полюс, S – южный геомагнитный полюс, G – географический полюс.

(8) можно представить в виде

$$V = R_E \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{n} P_n^m(\theta)\left[\{g_n^m (R_E/r)^{n+1} + C_n^m (r/R_E)^n\} \cos m\varphi + \{h_n^m (R_E/r)^{n+1} + S_n^m (r/R_E)^n\} \sin m\Phi\right]. \tag{9}$$

Здесь $P_n^m(\theta)$ – присоединенные функции Лежандра, R_E – радиус Земли и g_n^m, h_n^m, C_n^m, S_n^m – константы, известные как *коэффициенты Гаусса*. Члены, пропорциональные r^n, представляют источники магнитного поля, расположенные вне Земли, а члены, пропорциональные $(1/r)^{n+1}$, – источники поля, расположенные внутри Земли.

Потенциальная функция V прямо не измеряется, но, применив уравнение (6), мы можем получить выражения для геомагнитных элементов X, Y и Z. Если ряды сферических функций ограничить конечными значениями n и m (в общем случае $n = m \leqslant 12$), то для определения коэффициентов Гаусса можно использовать регрессионный анализ, который обеспечивает наилучшее соответствие для десятков тысяч значений геомагнитных элементов, полученных с помощью Мировой магнитной съемки. Когда это было сделано, то обнаружилось, что вклад внешних источни-

Таблица 3.1. Коэффициенты поля МЭГП эпохи 1965.0[1]

		Главное поле, нТл		Вековые вариации, нТл				Главное поле, нТл		Вековые вариации, нТл	
n	m	g_n^m	h_n^m	g_n^m	h_n^m	n	m	g_n^m	h_n^m	g_n^m	h_n^m
1	0	−30 339		15,3		6	2	4	106	1,1	−0,4
1	1	−2 123	5758	8,7	−2,3	6	3	−229	68	1,9	2,0
2	0	−1 654		−24,4		6	4	3	−32	−0,4	−1,1
2	1	2 994	−2006	0,3	−11,8	6	5	−4	−10	−0,4	0,1
2	2	1 567	130	−1,6	−16,7	6	6	−112	−13	−0,2	0,9
3	0	1 297		0,2		7	0	71		−0,5	
3	1	−2 036	−403	−10,8	4,2	7	1	−54	−57	−0,3	−1,1
3	2	1 289	242	0,7	0,7	7	2	0	−27	−0,7	0,3
3	3	843	−176	−3,8	−7,7	7	3	12	−8	−0,5	0,4
4	0	958		−0,7		7	4	−25	9	0,3	0,2
4	1	805	149	0,2	−0,1	7	5	−9	23	0,0	0,4
4	2	492	−280	−3,0	1,6	7	6	13	−19	−0,2	0,2
4	3	−392	8	−0,1	2,9	7	7	−2	−17	−0,6	0,3
4	4	256	−265	−2,1	−4,2	8	0	10		0,1	
5	0	−223		1,9		8	1	9	3	0,4	0,1
5	1	357	16	1,1	2,3	8	2	−3	−13	0,6	−0,2
5	2	246	125	2,9	1,7	8	3	−12	5	0,0	−0,3
5	3	−26	−123	0,6	−2,4	8	4	−4	−17	0,0	−0,2
5	4	−161	−107	0,0	0,8	8	5	7	4	−0,1	−0,3
5	5	−51	77	1,3	−0,3	8	6	−5	22	0,3	−0,4
6	0	47		−0,1		8	7	12	−3	−0,3	−0,3
6	1	60	−14	−0,3	−0,9	8	8	6	−16	−0,5	−0,3

[1] J. Geophys. Res. 74, 4407–4408 (1969).

ков в магнитное поле на поверхности Земли составляет менее 1%. (Во время магнитной бури он может достигать нескольких процентов, но, как мы отмечали, такие временные источники исключаются из данных магнитной съемки.) Таким образом, как показал Гаусс более 100 лет назад, геомагнитное поле обусловлено главным образом источниками, расположенными внутри Земли. Поэтому поле внутреннего происхождения называют *главным геомагнитным полем.*

Для МЭГП эпохи 1965 гармонический ряд был ограничен 80 членами ($n = m = 8$). Коэффициенты Гаусса для главного поля приведены в табл. 3.1[1]. Именно по этим коэффициентам построены карты, продемонстрированные на рис. 3.3–3.5. В табл. 3.1 приведены также скорости изменения коэффициентов Гаусса g_n^m и h_n^m. Они используются для построения карт поля вековых вариаций, показанных на рис. 3.7–3.9.

Коэффициент g_1^0, который является доминирующим, соответствует осевому геоцентрическому диполю, направленному с севера на юг. g_1^1 и h_1^1 соответствуют геоцентрическим диполям, лежащим в экваториальной плоскости и ответственным за наклонение диполя относительно оси вращения Земли. Геоцентрический диполь для МЭГП эпохи 1965 харак-

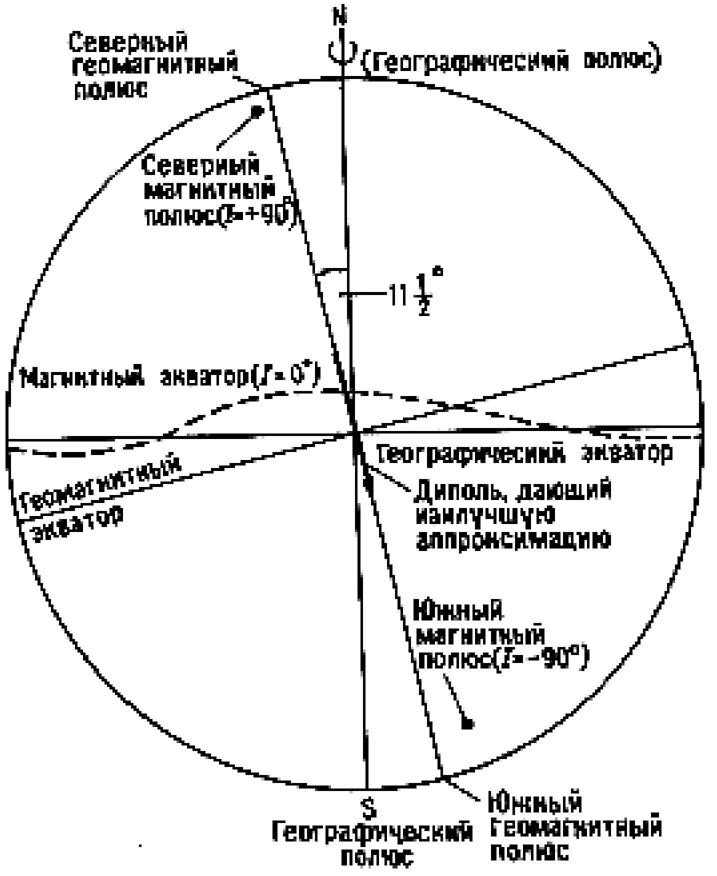


Рис. 3.14. Схематическое изображение различий между географическими, геомагнитными и магнитными полюсами и экваторами (McElhinny, 1973).

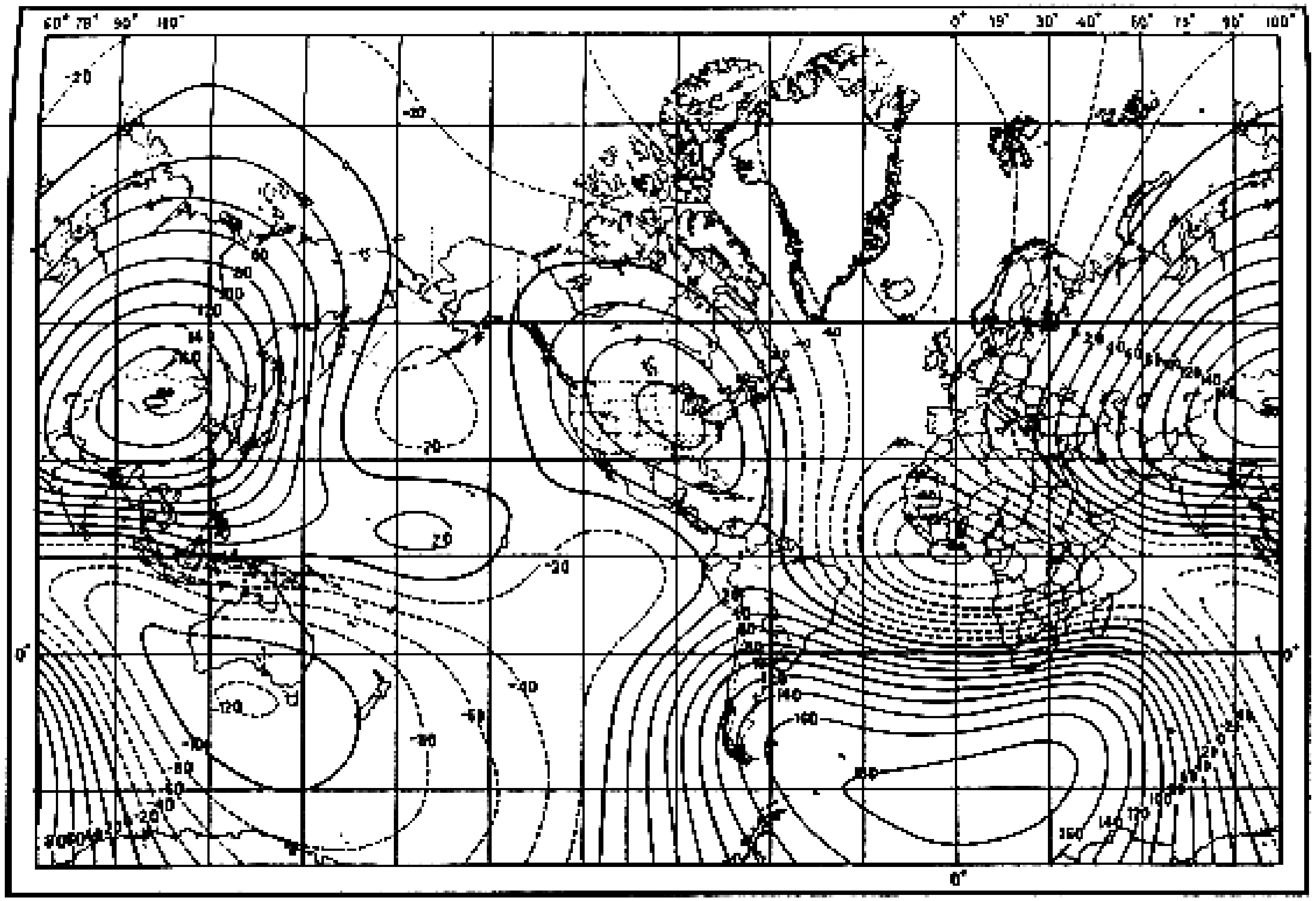


Рис. 3.15. Вертикальная компонента недипольного поля для эпохи 1965.0 в единицах 10^{-2} Гс (McDonald, Gunst, 1967).

[1] Коэффициенты для эталонных полей 1970, 1975 и 1980 гг. приведены в работе Eos, Trans. Am. Geophys. Union, 62, 1969, 1981.

теризуется магнитным моментом

$$M = R_E^3 [(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2]^{1/2} = 8{,}01 \cdot 10^{25} \text{ Гс} \cdot \text{см}^3.$$

Поскольку при соответствующем выборе начала координат системы (r, θ, φ) от коэффициентов g_2^0, g_2^1, h_2^1 можно избавиться, их можно рассматривать как члены, определяющие эксцентричность наклоненного диполя, дающего наилучшее представление о конфигурации магнитного поля Земли. Остальные коэффициенты соответствуют более слабым источникам, которые обусловливают большее отклонение от центрального положения по мере возрастания значения n. Однако нужно понимать, что отдельные члены или группы членов в гармонических рядах не соответствуют отдельным физически конкретным источникам.

Теперь получает ясное обоснование ранее высказанное положение о том, что геомагнитное поле с достаточно хорошим приближением можно описать как поле наклоненного геоцентрического диполя. Ось геоцентрического диполя (называемая геомагнитной осью), описывающего с наилучшим приближением МЭГП эпохи 1965, пересекает земную поверхность в антиподальных точках 78,6° с. ш., 69,8° з. д. и 78,6° ю. ш., 110,2° в. д., которые известны как северный и южный геомагнитный полюса соответственно. *Геомагнитные полюса* не следует путать с северным и южным *магнитными полюсами*. Первые не являются физической реальностью, тогда как положение последних можно установить с помощью магнитного компаса.

Для теоретических целей геомагнитная ось используется при определении системы *геомагнитных широт и долгот*. Большой круг, перпендикулярный геомагнитной оси, называется *геомагнитным экватором*, т. е. линией нулевого наклонения главного дипольного поля. На рис. 3.14 показаны различия между геомагнитной, магнитной и географической системами координат.

Если главное дипольное поле вычесть из наблюденного глобального поля, то остаточное поле будет соответствовать *недипольному полю*. Карты недипольного поля строятся по коэффициентам Гаусса, для которых $n \geqslant 2$. На рис. 3.15 представлена карта распределения вертикальной компоненты недипольного поля для эпохи 1965. Из нее видно, что недипольное поле не является совершенно хаотическим, а состоит из нескольких аномалий, размеры которых сравнимы с размерами континентов. Как и можно было ожидать, недипольное поле изменяется со временем. Одним из наиболее интересных изменений такого рода является видимая тенденция недипольного поля дрейфовать на запад со скоростью порядка 0,2°/год (см., например, Skiles, 1970).

2.3. Происхождение поля

Исследователь, занимающийся проблемами биомагнетизма, не обязан детально разбираться в магнитогидродинамических процессах, которые, как полагают, определяют существование геомагнитного поля. Однако общее представление о происхождении поля иметь необходимо, и особенно для того, чтобы можно было оценить эволюционное значение геомагнитных явлений.

Как мы уже видели, результаты математического анализа однозначно свидетельствуют о том, что бóльшая часть геомагнитного поля обусловлена источниками, расположенными внутри Земли. В настоящее время считается, что источники главного поля локализуются в жидком железном ядре Земли. Поэтому прежде всего подумаем, насколько правдоподобна такая локализация. Я употребляю слово «правдоподобна» потому, что внутренние области Земли ниже глубины порядка нескольких километров недоступны для непосредственных наблюдений. Все наши представления об этих областях исходят из математических моделей и соображений совместимости, которые в свою очередь опираются лишь на результаты измерений на поверхности.

Заметив, что магнитное поле Земли сходно с полем однородно намагниченной сферы, Гильберт (Gilbert, 1600) заявил: «Земля сама по себе является огромным магнитом». Однако, несмотря на всю красоту этого смелого утверждения, оно в дальнейшем было признано слишком упрощенным и претерпело изменения. Чтобы могло образоваться главное дипольное поле, вся Земля должна быть однородно намагничена и иметь интенсивность намагничивания около 0,075 Гс (Jacobs, 1963). Однако ниже глубин порядка 25 км температура внутри Земли превышает лабораторную температуру (точку Кюри), при которой железо сохраняет остаточную намагниченность. Поэтому любой намагниченный материал должен находиться в пределах верхних 25 км. Но если вопреки всем теоретическим и экспериментальным представлениям физики высоких давлений во внутренних частях Земли давление распределено таким образом, что оказывается возможным возникновение некой формы вещества, намагниченной при высоких температурах, то намагниченные породы могут встречаться и глубже 25 км. В этом случае для создания геомагнитного поля необходима постоянная намагниченность, превышающая 6 Гс. Обе эти величины намагниченности значительно больше тех значений, которыми обычно характеризуются породы земной коры. В редких случаях интенсивность намагничивания железной руды превышает 1 Гс, тогда как обычно она составляет около 0,03 Гс. Кроме того, нерудные породы, слагающие основную часть земной коры, характеризуются средней намагниченностью менее 100 нТл (Hahn, 1971).

Вторым доводом против существования постоянно намагниченного источника поля является тот факт, что этот источник не может объяснить вековые вариации. Так, например, скорость западного дрейфа порядка 0,2°/год для недипольного поля соответствует коровым скоростям более 20 км/год, что на несколько порядков больше величины, полученной в результате анализа спрединга океанического дна и дрейфа континентов и составляющей около 2–5 см/год.

В настоящее время существует целый ряд гипотез о происхождении

геомагнитного поля. В качестве возможных механизмов рассматриваются электромагнитная индукция, наводимая в проводящей Земле магнитными бурями, термоэлектрические токи, возникающие из-за наличия внутри Земли химических и тепловых неоднородностей, и собственный магнитный момент, обусловленный вращением массивного тела. Единственной гипотезой, выдержавшей как теоретическую, так и экспериментальную проверки, оказалась гипотеза «геодинамо», основная предпосылка которой состоит в том, что глубинные части Земли представляют собой электропроводящую жидкость. Вывод о существовании жидкого ядра радиусом около 3500 км сделан исходя из того факта, что ниже глубины примерно 2900 км скорость сейсмических P-волн (или продольных волн) резко уменьшается на 40%, а S-волны (или поперечные) перестают распространяться. Предположение о высокой плотности, которой должно обладать земное ядро для того, чтобы получила объяснение масса Земли, в совокупности с геохимическими соображениями указывает на то, что ядро состоит главным образом из железа и, следовательно, является хорошим проводником электричества.

Впервые предложенная Эльзассером (Elsasser, 1946) и Буллардом (Bullard, 1949) теория динамо в настоящее время является общепринятой, и ее дальнейшая разработка представляет собой одну из главных задач геофизики. Суть ее заключается в том, что движения внутри ядра, возникающие, вероятно, в результате тепловой или химической конвекции, усиливают текущие там электрические токи до тех пор, пока не установится равновесие между генерацией этих токов и их естественным омическим затуханием. Вращение Земли создает мощное ограничение для движений жидкости, и в результате образующиеся токи создают магнитное поле, приблизительно симметричное относительно оси вращения Земли. Поэтому примерное совпадение дипольной и географической осей не является случайным, а объясняется действием процессов динамо во вращающейся системе. Динамо-теория происхождения геомагнитного поля в математической форме, доступной даже для неспециалистов, детально рассмотрена в недавно опубликованных обзорах (Busse, 1978, 1980, 1983). Здесь же достаточно краткого качественного изложения ее сути.

Хотя детали теории динамо еще предстоит разработать, принципиальная возможность существования геодинамо уже продемонстрирована как теоретически, так и экспериментально. *Дисковое динамо Фарадея* отражает принцип работы этого механизма. Рассмотрим проводящий диск, вращающийся в присутствии магнитного поля, как это показано на рис. 3.16. В результате действия силы Лоренца $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ на содержащиеся в диске заряды его периферийная часть становится заряженной положительно, а ось – отрицательно. Если соединить ось с периферией диска постоянной цепью со скользящими контактами, то в ней потечет ток **j**, вследствие чего возникнет вторичное магнитное поле. Если цепь представляет собой катушку, направление тока в которой совпадает с направлением вращения диска, то вторичное магнитное поле

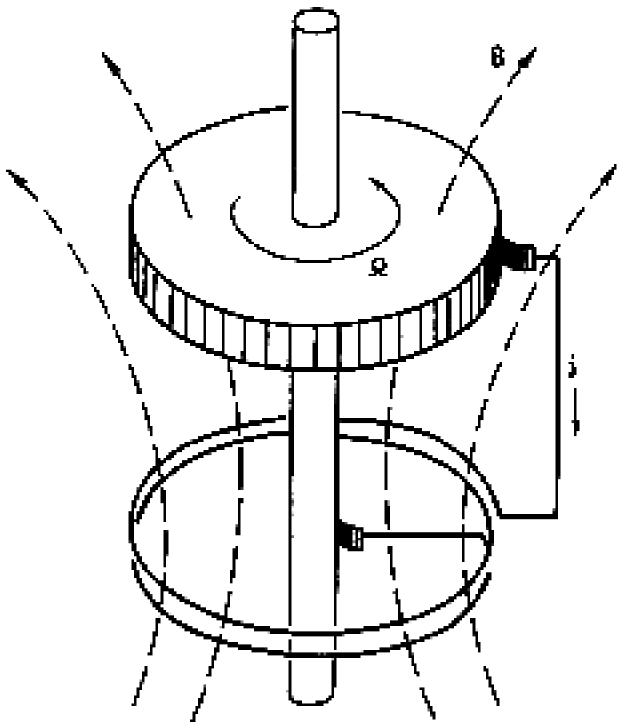


Рис. 3.16. Дисковое динамо, вращающееся с угловой скоростью Ω и создающее ток j и магнитное поле B. (Busse, 1980).

усилит первичное. Если радиус диска достаточно велик или диск вращается достаточно быстро, то источник первичного поля может быть удален и при этом величина вторичного поля будет увеличиваться до тех пор, пока не наступит равновесие между скоростью его регенерации и скоростью распада поля вследствие омической диссипации. Время распада поля для жидкой железной сферы, по размерам сопоставимой с ядром Земли, составит несколько тысяч лет. Следовательно, с некоторой степенью вероятности можно предположить, что медленного вращения Земли достаточно для создания самовозбуждающегося динамо.

На первый взгляд может показаться, что дисковое динамо противоречит законам термодинамики. Однако, даже если пренебречь механическим трением в местах крепления диска, на него все равно оказывала бы действие сила, пропорциональная $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$, препятствующая вращению. Таким образом, чтобы диск продолжал вращаться, к нему нужно непрерывно подводить энергию. При этом кинетическая энергия преобразуется в электромагнитную и затем в тепловую через омическую диссипацию. Источником энергии земного динамо может служить тепловая энергия, которая либо образуется в результате распада радиоактивных элементов в ядре, либо, как впервые предложил Ферхуген (Verhoogen, 1961), является скрытой теплотой, выделяющейся по мере медленного остывания жидкого внешнего ядра с образованием твердого внутреннего. По мнению большинства геофизиков, энергетическим источником геодинамо является гравитационная энергия, высвобождаемая по мере того, как легкие элементы, выделяющиеся в результате кристаллизации на границе внешнего и внутреннего ядра, всплывают вверх через внешнее ядро (Stevenson, 1981).

Дисковое динамо характеризуется двумя очень интересными особен-

ностями. Во-первых, оно создает дипольное поле на больших расстояниях. Во-вторых, если направление вращения диска и направление закручивания витков катушки остаются неизменными, система все равно будет работать как динамо, создающее поле в направлении, противоположном тому, которое показано на рис. 3.16. Это означает, что направление существующего главного дипольного поля Земли также могло быть и обратным. Действительно, как мы вскоре увидим, существует множество доказательств того, что на протяжении геологической истории дипольное поле несколько раз меняло свой знак.

К сожалению, все попытки применить дисковое динамо в качестве модели ядра Земли всегда сталкивались с неразрешимой проблемой – дисковое динамо топологически отличается от ядра. В то время как ядро представляет собой сплошное тело, дисковое динамо подобно бублику с дыркой. Все попытки создать сплошное динамо Фарадея без дырки приводили к тому, что оно переставало работать как динамо. Однако эту трудность удалось преодолеть, когда Герценберг (Herzenberg, 1958) показал теоретически, а Лоус и Уилкинсон (Lowes, Wilkinson, 1963) экспериментально подтвердили, что такое динамо возможно.

Лабораторное динамо Лоуса – Уилкинсона состоит из двух вращающихся проводящих цилиндров, ориентированных перпендикулярно друг другу и помещенных в проводящую среду. Вся система действует по принципу положительной обратной связи: ток в одном цилиндре индуцируется магнитным полем другого, и наоборот. Следует отметить, что эта модель объясняет даже «инверсии» магнитного поля – через непредсказуемые интервалы времени магнитные поля, создаваемые механизмом динамо, становятся неустойчивыми и через несколько секунд преобретают новые направления.

Хотя двухцилиндровое динамо удовлетворяет топологическому условию простого соединения, оно не создает дипольного поля и геометрия его никаким очевидным образом не соответствует геометрии ядра. Но и не обладая особым воображением, можно представить себе аналогичную ситуацию, когда крупномасштабные вихри внутри ядра генерируются индуктивным взаимодействием полей друг друга с образованием самовозбуждающегося динамо. Однако аналогия эта является в лучшем случае эвристической, и истинная природа происхождения геомагнитного поля остается одной из нерешенных физических проблем.

Качественно геодинамо можно рассматривать как упорядоченный механизм, создающий высокоупорядоченное дипольное поле, а недипольное поле, коэффициенты Гаусса которого составляют приблизительно 10% от дипольных коэффициентов, обусловлено возмущениями этого упорядоченного механизма, вызываемыми, возможно, крупномасштабными вихрями внутри ядра. Таким образом, вековые вариации могут быть результатом поступательного движения этих вихрей (вспомните западный дрейф), изменений интенсивности движений внутри вихрей или возникновения новых вихрей и разрушения существующих.

Однако это идеализированное представление может быть ошибоч-

ным. Хотя дипольный член, безусловно, преобладает в уравнении (9), магнитное поле в ядре, несомненно, менее упорядочено, чем поле на поверхности Земли. Так, изменения напряженности дипольного и недипольного полей пропорциональны соответственно $1/r^3$ и по крайней мере $1/r^4$. Следовательно, при радиусе $R_E/2$, соответствующем внешней части ядра, отношение недипольных членов к дипольным увеличивается в 2 раза для членов с $n = 2$, в 4 раза для $n = 3$ и т. д. Таким образом, дипольная конфигурация поля на поверхности Земли частично связана с геометрическим затуханием недипольного поля. Весьма вероятно, что геодинамо может быть результатом весьма неупорядоченного процесса, возможно турбулентного, но обладающего некоторой глобальной упорядоченностью, связанной с инерциальными силами вращения Земли. Какой бы ни была природа динамо, процесс этот неустойчив. Как следует из табл. 3.1, в настоящее время напряженность поля геоцентрического диполя уменьшается со скоростью, которая может привести к его исчезновению приблизительно через 2000 лет.

При исследовании процессов, происходящих в любом варианте геомагнитного динамо, неизбежно возникает вопрос о том, что послужило источником первоначального поля, которое привело в действие механизм динамо. Ответ на этот вопрос, вероятно, никогда не будет получен. Достаточно сказать, что им могло быть любое случайное поле, а их, несомненно, было множество. Наиболее реальными с этой точки зрения представляются поля, индуцированные солнечным ветром или образованные термоэлектрическими токами, возникшими из-за присутствия внутри Земли тепловых и химических неоднородностей.

Более важным вопросом является возраст геомагнитного поля. Если природа поля действительно связана с динамо, то естественно предположить, что его возраст соответствует возрасту жидкого ядра Земли, но только при условии существования адекватного источника энергии. Эльзассер (Elsasser, 1963) предположил, что формирование ядра закончилось не ранее 3 млрд. лет назад, но по современным представлениям ядро было сформировано около 4,5 млрд. лет назад (Ringwood, 1979; Stevenson, 1981). Например, «ископаемая» намагниченность некоторых древнейших пород служит прямым доказательством того, что возраст поля составляет по крайней мере 3,5 млрд. лет (McElhinny, Senanayke, 1980). Потенциальное значение этих данных для понимания органической эволюции очевидно. Вполне вероятно, что в период возникновения и развития жизни геомагнитное поле уже существовало, и оно, несомненно, появилось раньше предполагаемого времени возникновения эукариот, которое оценивается в $1{,}4 \pm 0{,}1$ млрд. лет назад (Schopf, Oehler, 1976).

2.4. Характер поля в геологическом прошлом

Принимая во внимание теоретические соображения, согласно которым возраст геомагнитного поля сравним с возрастом Земли, рассмотрим

теперь экспериментальные результаты, свидетельствующие о существовании определенной конфигурации и поведении поля в геологическом прошлом,– *палеомагнитные данные*. Подобно тому как о главных особенностях и некоторых деталях органической эволюции можно судить, анализируя окаменелые органические остатки, историю геомагнитного поля можно воссоздать благодаря «ископаемому магнетизму».

Большинство горных пород в процессе формирования приобретают *естественную остаточную намагниченность* (NRM) – слабую намагниченность, направление которой, как правило, совпадает с направлением вектора геомагнитного поля, соответствовавшего данному месту во время образования породы. Обычно NRM – намагниченность вполне «жесткая», т. е. стабильная и постоянная, и ее измерения позволяют определять геомагнитное поле, существовавшее в прошлом. Напряженность и направление древнего поля можно найти, измеряя NRM пород, ориентация которых во время их образования может быть установлена.

NRM создается магнитными минералами, главным образом оксидами железа и титана, которые в небольших количествах почти всегда содержатся в любой породе. Поскольку события, происходившие после формирования породы, такие как удары молнией или химические реакции, могут изменять или разрушать первичную NRM, для палеомагнитных исследований пригодны далеко не все породы, обладающие NRM. Методика экспериментов, проводимых с целью выделения и в некоторых случая устранения искажающих вторичных компонент намагниченности, разработана достаточно хорошо (вторичная NRM часто бывает довольно «мягкой» и легко разрушается термической или магнитной чисткой). Поэтому в настоящее время палеомагнетизм составляет одно из главных направлений геофизики.

Физические основы магнетизма горных пород и методика измерения очень слабой остаточной намагниченности рассмотрены в других главах этой книги. Здесь достаточно будет указать виды NRM, позволившие получить основной объем палеомагнитных данных. По мере остывания и кристаллизации магмы изверженные породы образуются либо в виде лавового потока на поверхности Земли, либо в виде плутонических интрузий на глубине. При этом магнитные минералы проходят через соответствующие им точки Кюри (для магнетита Fe_3O_4 – 578°C) и приобретают *термоостаточную намагниченность* (TRM). Фронт охлаждения медленно проходит через породы, особенно плутонические, оставляя за собой постоянную «запись» поля, интерпретация которой позволяет делать вывод о палеовековых вариациях. Магнитные моменты тонкозернистых магнитных материалов в неконсолидированных пресноводных и морских осадках, как правило, ориентируются вдоль направления внешнего магнитного поля. При этом литифицированные позже осадки приобретают *ориентационную (или седиментационную) остаточную намагниченность* (DRM). Колонки осадочных отложений, отобранные из озер и глубоководных районов океанов, содержат непрерывную запись древнего магнитного поля, охватывающую подчас

несколько миллионов лет. Интересно отметить (Kirschvink, Lowenstam, 1979), что значительная часть DRM в океанических осадках может быть связана с биогенным магнетитом, главным образом из зубцов полиплакофоры.

Если магнитный минерал образуется в присутствии магнитного поля при комнатной температуре, он приобретет *химическую остаточную намагниченность* (CRM) в том случае, если размер зерен минерала превысит некую критическую величину – блокирующий диаметр. Например, в осадках CRM может возникать по мере роста магнитных зерен в результате аккреции или в породах различных типов при окислении железосодержащих соединений в процессе выветривания. Предполагают, что остаточная намагниченность, обнаруженная в различных организмах – от хитонов (Kirschvink, Lowenstam, 1979) и пчел (Gould et al., 1978) до голубей (Walcott et al., 1979) и дельфинов (Zoeger et al., 1981), в основном связана именно с CRM, приобретенной в процессе биоминерализации in vivo. Чтобы отличить NRM биогенной природы (независимо от способа ее приобретения) от NRM небиогенной природы, был введен термин *биогенная остаточная намагниченность*, или *биоостаточная намагниченность* (BRM).

Большинство палеомагнитных данных получают в результате изучения пород, которые приобрели остаточную намагниченность в естественных условиях. Однако весьма интересную, хотя и немногочисленную группу данных позволили получить предметы, найденные в местах проведения археологических раскопок. Это кирпичи, гончарные изделия, печи и очаги, которые нагревались от огня, разведенного человеком. Полученные в результате подобных исследований так называемые *археомагнитные* данные часто имеют точную временнýю привязку и, таким образом, несут в себе ценную информацию о геомагнитном поле за последние несколько тысяч лет.

Очевидно, что невозможно получить наборы одновозрастных палеомагнитных данных для всей Земли. Такие комплексы пород, как лавовые потоки, образуются в результате событий, изолированных и во времени, и в пространстве. Изучение осадочных пород может обеспечить получение непрерывных рядов данных, дополняемых также сведениями из других мест, но тем не менее полученная до последнего времени информация по осадочным породам не охватывает всего земного шара. Кроме того, за некоторыми исключениями, их невозможно датировать и коррелировать с достаточной степенью точности, исключающей дисперсию, связанную с вековыми вариациями геомагнитного поля. Следовательно, необходима какая-то унифицированная концепция, с помощью которой можно было бы преобразовывать разрозненные данные в синоптическую модель поля, соответствующего определенной геологической эре. Такая модель позволила бы осуществить осмысленную интерпретацию не совпадающих по времени палеомагнитных данных из различных районов и, что особенно важно, сравнить древнее геомагнитное поле с современным.

В основе построения соответствующей модели лежат теоретические соображения и экспериментальные наблюдения. Во-первых, хотя геодинамо – это явление, зависящее от времени, вряд ли общая природа механизма динамо меняется во времени. Следовательно, общая природа геомагнитного поля не должна изменяться во времени. Во-вторых, жесткая компонента NRM в породах, сформировавшихся за последние несколько миллионов лет, почти всегда приблизительно параллельна или антипараллельна современному геомагнитному полю. Поскольку это наблюдается по всему земному шару, можно сделать вывод, что общая конфигурация геомагнитного поля за последние несколько миллионов лет не изменялась. Эти наблюдения непосредственно привели к созданию *дипольной гипотезы*, суть которой заключается в том, что геомагнитное поле всегда (за исключением, возможно, периодов инверсий) достаточно точно аппроксимировалось полем геоцентрического диполя. Согласно этой гипотезе, палеомагнитные данные следует рассматривать в рамках представлений об идеальном дипольном поле.

Поскольку конфигурация и напряженность дипольного поля однозначно определяются измерениями магнитных элементов в заданной точке, *дипольная гипотеза* дает возможность непосредственно сравнивать палеомагнитные данные, полученные в разных районах. На расстоянии R_E от центра геоцентрического диполя, ориентированного с геомагнитного севера на юг, магнитные элементы Z, H и I определяются следующим образом:

$$Z = 2M\cos\theta/R_E^3, \tag{10}$$

$$H = M\sin\theta/R_E^3, \tag{11}$$

$$\operatorname{tg} I = Z/H = 2\operatorname{ctg}\theta, \tag{12}$$

где M – момент диполя, а θ – дипольная или геомагнитная коширота, т. е. угол, измеряемый по дуге большого круга, который проходит по земной поверхности и соединяет точку, где измеряется поле, с северным геомагнитным полюсом. Для дипольного поля H направлено прямо на северный геомагнитный полюс. Таким образом, геомагнитное наклонение в любой заданной точке однозначно определяет местоположение северного геомагнитного полюса в соответствии с уравнением (12). Тогда, зная напряженность поля и используя уравнение (10) или (11), можно определить момент диполя M.

Измерив направление NRM образца, отобранного в данном районе, можно определить направление и, следовательно, наклонение I древнего магнитного поля, существовавшего во время формирования этой породы. Величина I в уравнении (12) определяет положение *виртуального геомагнитного полюса* (ВГП), т. е. геомагнитного северного полюса, соответствующего гипотетическому геоцентрическому диполю, который мог создать измеренную NRM. Аналогичным образом величина напряженности древнего магнитного поля через уравнения (10) и (11) определяет величину *момента виртуального диполя* палеомагнитного поля. Однако из-за присутствия в палеомагнитном поле недипольной компоненты ВГП лишь приблизительно определяет положение северного геомагнитного полюса, которое можно было бы получить, если бы мы могли провести глобальную съемку древнего магнитного поля. Координаты ВГП, найденные по одновозрастным палеомагнитным данным, полученным из разных районов, не будут совпадать, но их разброс будет пропорционален величине недипольной компоненты древнего поля.

В случае современного геомагнитного поля направление вектора напряженности в любой точке отличается от направления подобранного наилучшим образом наклоненного геоцентрического диполя не более чем на 25° (за исключением тех случаев, когда точка находится вблизи сильной магнитной аномалии). Поэтому ВГП почти для любой точки земного шара довольно хорошо аппроксимирует положение северного геомагнитного полюса. Влияние современного недипольного поля показано на рис. 3.17, где нанесены положения ВГП, определенные по направлениям поля, измеренным в нескольких магнитных обсерваториях. Все ВГП отклоняются от северного геомагнитного полюса не более чем на 20°, а средние положения ВГП совпадают с геомагнитным полюсом.

С учетом вековых вариаций результаты, представленные на рис. 3.17, аналогичны тем, которых можно было бы ожидать при измерениях направления поля в каком-либо районе, скажем, за несколько веков. Однако, учитывая упорядоченный характер вариаций D и I в заданном районе (см. рис. 3.6), разброс координат ВГП не должен быть столь хаотичным, а скорее всего они должны были бы располагаться приблизительно вдоль гладких кривых. Среднее положение ВГП будет соответствовать среднему геомагнитному полюсу для рассмотренного периода времени. Основываясь на магнитных съемках, выполненных в этом столетии, представляется, что в масштабе веков положения геомагнитных полюсов почти не меняются. Кейн и Хендрикс (Cain, Hendricks, 1968) подсчитали, что в период между 1900 и 1965 гг. положение северного магнитного полюса изменилось лишь на 0,3° по широте и на 1,5° по долготе. Преобладающее движение полюса в это время характеризовалось западным дрейфом со средней скоростью около 0,015°/год. Двигаясь с такой скоростью, геомагнитный полюс опишет окружность вокруг географического полюса за 24 000 лет. Следовательно, усредненное за длительный период времени положение геомагнитного полюса будет стремиться к совпадению с местоположением географического полюса, даже если мгновенный геомагнитный полюс никогда не совпадет с географическим. Это наблюдение привело к появлению *гипотезы осевого геоцентрического диполя*, согласно которой положение оси диполя, усредненное по достаточно длительным периодам времени (возможно, порядка 10^4–10^5 лет), совпадает с положением географической оси. С точки зрения теории динамо эта гипотеза представляется вполне правдоподобной, потому что даже если наклонение диполя является устойчивой характеристикой магнитного поля – воз-

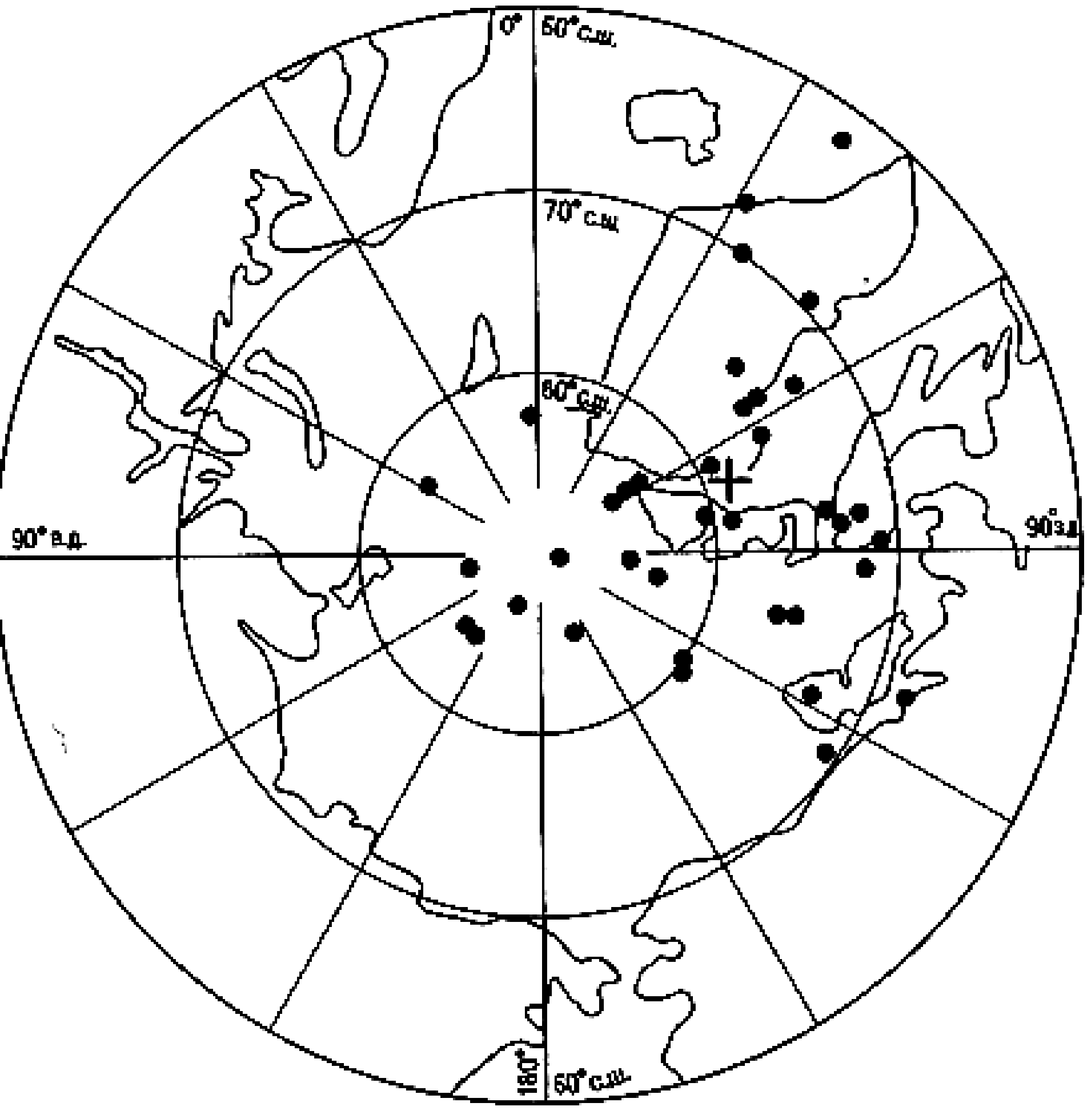


Рис. 3.17. Виртуальные палеомагнитные полюса, положения которых рассчитаны по магнитным склонениям и наклонениям, измеренным глобальной сетью современных геомагнитных обсерваторий. Среднее положение ВГП (крест) почти точно совпадает с северным геомагнитным полюсом (Doell, Cox, 1961).

можно, вследствие различных скоростей прецессии ядра и мантии (Malkus, 1968), – нет причин предполагать, что диполь должен быть наклонен в каком-то заданном направлении.

В стандартном палеомагнитном исследовании изучаются образцы пород, отобранные в определенном районе. Эти образцы могут характеризовать либо разрез лавовых потоков, охватывающих тысячи лет, либо различные части области плутонических пород, охлаждавшихся на протяжении тысячелетий. Вследствие вековых вариаций соответствующий набор координат ВГП будет характеризоваться большим разбросом (см. рис. 3.17). Но согласно гипотезе осевого диполя, среднее положение ВГП, называемое *палеомагнитным полюсом*, будет совпадать с палеогеографическим полюсом.

Гипотеза осевого геоцентрического диполя была проверена двумя принципиально различными способами. В первом случае для заданной серии пород проводилось сравнение палеоширот, определенных по палеоклиматическим данным (таким как широтное распределение ископаемых коралловых рифов) и по палеомагнитным данным. Результаты сравнения оказались достаточно хорошими (см., например, Briden, Irving, 1964). Во втором случае применялся более точный метод, состоявший в проверке внутренней согласованности палеомагнитных данных по разным районам.

Опдайк и Генри (Opdyke, Henry, 1969) провели палеомагнитные исследования глубоководных колонок грунта, охватывающих последние 2,5 млн. лет. Полученные ими результаты также подтвердили гипотезу осевого диполя. Поскольку известна лишь вертикальная ориентировка глубоководного керна, невозможно определить абсолютное значение палеомагнитного склонения и вычислить положение виртуального полюса. Поэтому Опдайк и Генри сравнили кривую, полученную по уравнению (12), с графиком зависимости палеомагнитных наклонений от географической широты, на которой был отобран керн. На рис. 3.18 показаны результаты этого сравнения для 50 колонок, отобранных на географических широтах между 55° с. ш. и 62° ю. ш. Каждая точка на рисунке отражает измерения одного керна и, таким образом, соответствует среднему значению наклонения магнитного поля за последние 700 000 лет – интервал времени, более чем достаточный для проверки гипотезы диполя. Аналогичные результаты были получены при изучении 15 колонок, возраст которых охватывает период времени от 0,7 до 2,5 млн. лет.

Если древнее поле в самом деле было приблизительно дипольным, то положения палеомагнитного полюса, определенные по различным районам, должны быть тесно сгруппированы. На рис. 3.19 показаны положения полюса в триасовый период (от 190 до 225 млн. лет назад), которые были найдены по образцам, отобранным из различных районов Северной Америки. Поскольку данные охватывают примерно 35 млн. лет, а возраст исследованных пород составляет около 200 млн. лет, образовавшаяся группа точек представляется вполне компактной. Согласно Странгвею (Strangway, 1970), наиболее расходящиеся координаты полюсов (расположенные на северном побережье Сибири до Берингова моря) соответствуют ранним палеомагнитным измерениям, при получении которых не проводились в достаточной мере эксперименты по выделению первичной NRM. Положения полюсов в триасе, определенные по породам из СССР, также тесно сгруппированы, но вокруг точки, расположенной в Тихом океане вблизи оконечности Камчатки. (Такие различия в местоположении среднего палеомагнитного полюса по разным континентам – одно из неопровержимых свидетельств дрейфа континентов.) Результаты, полученные для триаса, подтверждают дипольную конфигурацию магнитного поля, но из-за их отклонения от положения современного географического полюса вследствие континентально-

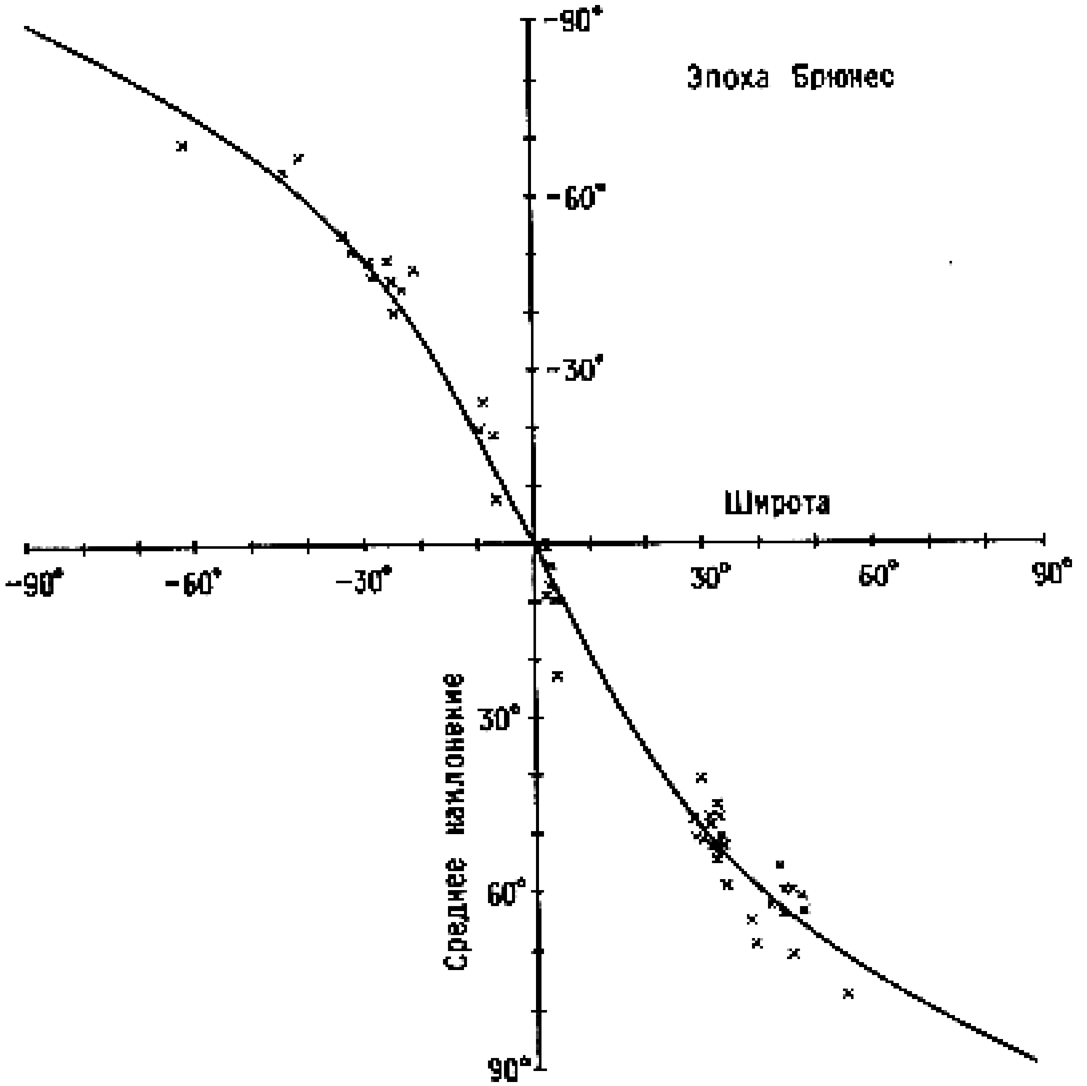


Рис. 3.18. Зависимость среднего палеомагнитного наклонения от широты отбора керна для нескольких глубоководных колонок (x), охватывающих последние 700 000 лет. Кривая - зависимость наклонения от широты, соответствующая осевому геоцентрическому диполю (Opdyke, Henry, 1969).

го дрейфа они не содержат информации о его симметрии относительно географической оси. Однако дрейф континентов оказал незначительное влияние на положение палеомагнитных полюсов, которые определялись по породам моложе 25 млн. лет и действительно группируются вблизи современного географического полюса.

Таким образом, дипольный характер геомагнитного поля для большей части геологического прошлого достаточно хорошо установлен. Исследования положений полюсов, проведенные в Северной Америке, показали, что в четвертичный, триасовый и меловой периоды они группируются еще более тесно, а в юрский, пермский и каменноугольный - чуть менее тесно, чем в триасе (рис. 3.19). И хотя данные для нижнего палеозоя весьма немногочисленны, найденные по ним палеополюса группируются примерно таким же образом, как и для верхнего палеозоя (Strangway, 1970).

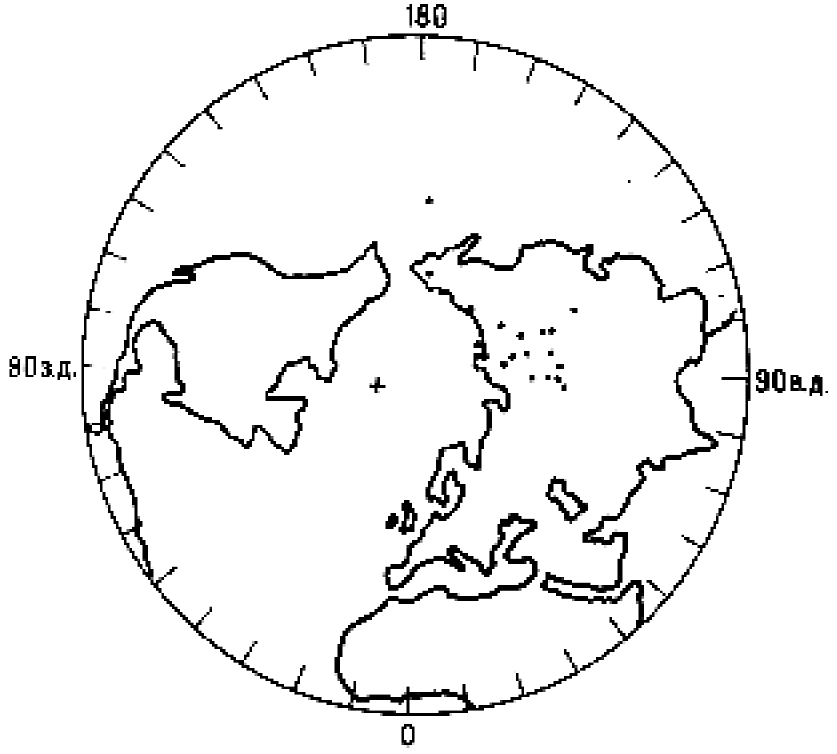


Рис. 3.19. Положение палеомагнитных полюсов в триасовый период для пород, отобранных в Северной Америке (Strangway, 1970).

На рис. 3.20 показаны палеомагнитные полюса (71 определение), полученные по докембрийским породам Северной Америки до 1970 г. Поскольку исходные данные охватывают интервал времени в 2 млрд. лет, можно ожидать достаточно большого разброса результатов. Однако характер их распределения достаточно далек от случайного - через них можно провести кривую, называемую *кажущейся траекторией миграции полюса* (КТМП). Плавный характер кривой и малая дисперсия большинства положений полюсов относительно нее хорошо согласуются с дипольной конфигурацией поля. Предполагают, что КТМП связана главным образом с дрейфом Северо-Американского континента относительно географического полюса. Однако частично она может быть связана и с истинной миграцией полюса, т. е. с перемещением географической оси относительно всего твердого тела Земли.

Анализируя всю совокупность приведенных результатов, не следует упускать из виду тот факт, что гипотеза осевого диполя применима только к конфигурации геомагнитного поля, усредненного за 10^4-10^5 лет. Пересматривая теорию геодинамо, Басс (Busse, 1980) отметил, что наклонение диполя порядка 10°, по-видимому, характерно для планетарных магнитных полей и, вероятно, является свойством, присущим планетарным динамо. Как указали Макелинни и Меррилл (McElhinny, Merrill, 1975), около половины положений палеомагнитных полюсов для последних 5 млн. лет, полученных по данным отдельного района, не совпадают с положением географического полюса, поскольку исходные данные охватывают недостаточный интервал времени.

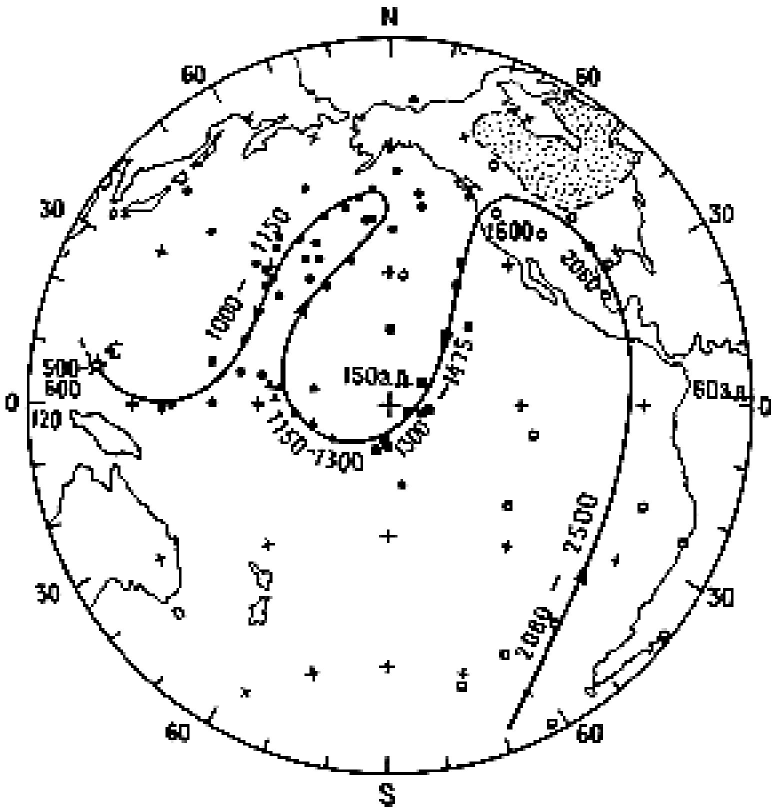


Рис. 3.20. Палеомагнитные полюса в докембрии и кажущаяся траектория миграции полюса для Северной Америки. Около кривой указан возраст в миллионах лет (McElhinny, 1973).

Причинами разброса положений палеомагнитных полюсов служат такие факторы, как экспериментальная ошибка, дрейф континентов, нутация географического полюса, вековые вариации и недипольные составляющие поля. Хотя эффекты этих источников могут затушевывать друг друга, имеет смысл считать разброс положений полюсов приблизительным отражением средних величин вековых вариаций и недипольного поля. Тогда из рассмотрения данных, приведенных на рис. 3.17–3.20, можно сделать вывод, что изменения вековых вариаций и недипольного поля в геологическом прошлом были не так уж велики.

Результаты детальных исследований подтверждают эту точку зрения. Брок (Brock, 1971) показал, что относительную меру палеовековой вариации можно получить по дисперсии положений полюса, и нашел, что средняя вековая вариация до кайнозоя была примерно на 15% меньше, чем в течение кайнозоя. К аналогичным выводам пришли Ирвинг и Пулайя (Irving, Pullaiah, 1976), детально проанализировав палеомагнитные данные за последние 350 лет. Они установили, что в последние 100 млн. лет вековая вариация была несколько большей, чем в предшествующие 250 млн. лет. Брок (Brock, 1971) предположил также, что частота инверсий геомагнитного поля коррелирует с амплитудой вековой вариации, которая в свою очередь коррелирует с величиной недипольного поля. Если высказанное предположение верно, то и

изменение скорости инверсий, показанное на рис. 3.30, приближенно отражает характер вековой вариации и недипольного поля в фанерозое.

Макелинни и Меррилл (McElhinny, Merrill, 1975) выделили вклад вековой вариации в угловую дисперсию ВГП для последних 5 млн. лет по опубликованным данным. Поскольку средняя угловая дисперсия составляет около 16° для всего периода времени, но лишь около 9° для голоцена, они пришли к выводу о том, что в голоцене вековая вариация была несколько меньше нормы для 5 млн. лет.

2.5. Напряженность палеомагнитного поля и его возраст

Как уже отмечалось ранее, коэффициенты Гаусса для дипольного поля изменяются быстро (табл. 3.1), указывая на то, что значительные изменения напряженности магнитного поля могут происходить только за несколько веков. И в самом деле, за 100 лет, прошедшие с тех пор как в 1835 г. Гаусс впервые рассчитал дипольный момент Земли, составивший около $8{,}55 \cdot 10^{25}$ Гс·см^3, его величина уменьшилась на 5%. Является ли эта скорость типичной? Как долго она будет сохраняться? Ответить на второй вопрос можно лишь предположительно. Что касается первого вопроса, то частичный ответ на него дают определения напряженности палеомагнитного поля.

К сожалению, достоверных определений напряженности существовавшего в прошлом поля гораздо меньше, чем определений ВГП, поскольку методика их гораздо сложнее и требует бóльших затрат времени. По существу она сводится к измерению естественной TRM образца J_p, нагреву образца до температуры выше точки Кюри и охлаждению его в лабораторном поле с заданной напряженностью F_0, во время которого он приобретает новую TRM. Затем напряженность палеополя F_p определяется по формуле

$$F_p = (J_p/J_0)F_0 \qquad (13)$$

Несмотря на всю свою принципиальную простоту, эта методика часто оказывается несостоятельной, так как нагрев образца может привести к изменению его магнитных свойств и применение уравнения (13) станет невозможным. Кроме того, с момента образования магнитные свойства образца могли измениться под действием естественных процессов, так что даже при сохранении ориентации палеомагнитного поля его напряженность не сохранится. Правда, как правило, непригодные образцы удается сразу отбраковать и после этого получить достоверные (или по крайней мере внутренне согласованные) значения напряженности древнего поля. Однако процедура не ограничивается одним только непосредственным применением уравнения (13). Наиболее широко используемая методика, известная как метод Телье (Thellier, Thellier, 1959), включает в себя нагрев и охлаждение образца в последовательно увеличивающихся

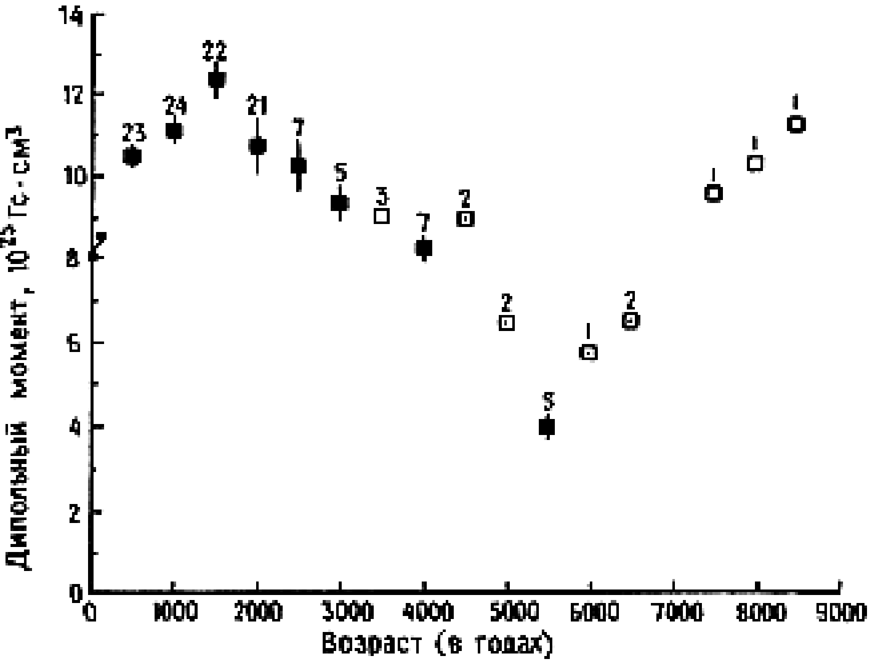


Рис. 3.21. Вариация геомагнитного дипольного момента за последние 9000 лет, рассчитанная по определениям напряженности палеополя, сделанным до 1967 г. Каждая точка соответствует среднему значению виртуальных дипольных моментов для интервала времени 500 лет. Над каждой точкой указано число проведенных измерений, а вертикальной линией изображено среднеквадратичное отклонение (Cox, 1968).

температурных интервалах до тех пор, пока не будет достигнута точка Кюри; после этого NRM, разрушенная при нагревании, сравнивается с TRM, приобретенной при охлаждении в заданном поле. Затем, чтобы определить, повлияли или нет циклы нагрева до высоких температур на магнитные свойства образцов в низкотемпературных интервалах, процесс последовательных нагревов повторяется. Если характер магнитных свойств не изменился и величина напряженности, определенная с помощью уравнения (13), одинакова для всех температурных интервалов, то эта величина считается достоверной. Более подробно методы определения напряженности палеомагнитного поля рассматриваются в работе (Carmichael, 1977).

На рис. 3.21 показаны результаты определения напряженности поля в голоцене, усредненные по 127 измерениям, которые были проведены до 1967 г. (Cox, 1968). С помощью уравнений (10)–(12) полученные значения были переведены в виртуальные дипольные моменты и усреднены для 500-летних интервалов времени. Такое усреднение уменьшает разброс, связанный с недипольным полем и вековыми вариациями. Очевидно, что за последние 9000 лет напряженность дипольного поля варьировала относительно ее современной величины примерно на 50%. Эти результаты охватывают слишком короткий промежуток времени, так что по ним трудно судить об истинном поведении магнитного поля в течение длительного интервала времени. Однако они позволяют установить периодический характер колебаний амплитуды с полупериодом около

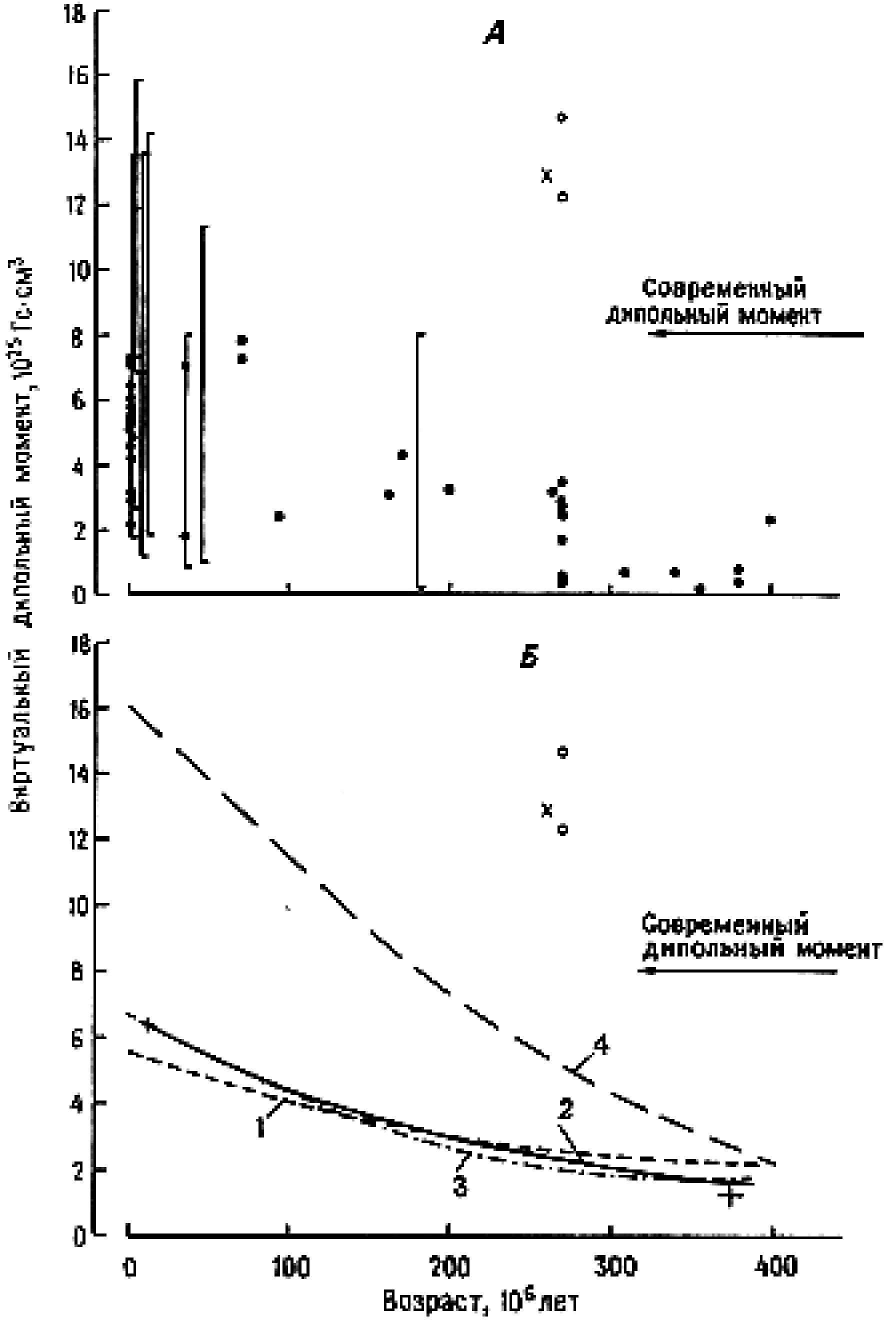


Рис. 3.22. (*А*) Виртуальные дипольные моменты для фанерозоя до голоцена по доступным данным до 1967 г. Точки соответствуют данным для тех случаев, когда число использованных комплексов пород было меньше 10. Вертикальные линии отвечают диапазону значений, полученных в результате исследований 10 и более комплексов пород. (*Б*) Кривые *1*–*3* получены по данным, показанным на рис. (*А*). Кривая 4 представляет собой наилучшую верхнюю границу для всех данных, за исключением трех аномально высоких значений дипольных моментов, соответствующих возрасту 270 млн. лет (Smith, 1967).

4000 лет. Это прекрасно согласуется с теоретическими оценками времени собственного затухания электрических токов в земном ядре (менее 10^4 лет).

На рис. 3.22 приводятся значения дипольного момента палеомагнитного поля для периода времени, предшествовавшего голоцену (Smith,

1967). Эти данные свидетельствуют о неуклонном увеличении как среднего момента диполя, так и амплитуды его вариаций за последние 400 млн. лет. Однако, по мнению Смита, отмеченный вполне реальный рост значений мог быть связан со старением пород. В геологическом прошлом первичная TRM могла разрушиться или возникнуть вторичная достаточно интенсивная компонента CRM, в результате чего эксперимент мог оказаться несостоятельным. С этими соображениями согласуются три необычайно высоких значения дипольных моментов, полученных для пород возраста около 270 млн. лет, которые характеризуются исключительно высокой магнитной стабильностью. С другой стороны, Макелинни (McElhinny, 1973) и Кармайкл (Carmichael, 1967) утверждают, что примерно 500 млн. лет назад наблюдался реальный минимум напряженности магнитного поля, поскольку опубликованные данные о напряженности палеомагнитного поля в докембрии сравнимы с современными значениями или больше их. Например, по данным Берга (Bergh, 1970), величина напряженности, измеренная на породах возраста 2,45 млрд. лет, составляет примерно две трети от современной, а по оценке Макелинни и Эванса (Mc Elhinny, Evans, 1968), породам возраста 2,65 млрд. лет отвечает напряженность, примерно на 50% превышающая современную.

Эти последние определения напряженности в сочетании с данными о характере распределения палеомагнитных полюсов, показанными на рис. 3.20, свидетельствуют о несомненном существовании геомагнитного поля в докембрии. Недавно Макелинни и Сенанайке (McElhinny, Senanayke, 1980) получили палеомагнитное доказательство того, что возраст поля составляет по крайней мере 3,5 млрд. лет, что сравнимо с возрастом древнейших изученных пород.

Таким образом, все изложенное выше позволяет с достаточной уверенностью утверждать, что, хотя конфигурация геомагнитного поля меняется во времени, древнее поле в основных чертах было похоже на современное, т. е. на магнитное поле, средняя напряженность которого на поверхности Земли составляет порядка 0,1–1 Гс; направление для большинства точек земной поверхности (за исключением точек вблизи крупных аномалий, создаваемых магнитными массами в земной коре) лишь незначительно отличается (максимальный угол отклонения составляет 25° для современного поля) от направления поля геоцентрического диполя, наклоненного относительно географической оси примерно на 10°. Конечно, учитывая возраст поля, не стоит удивляться некоторым исключениям из общего правила. Действительно, во время инверсии или в период времени до и после инверсии главного диполя напряженность магнитного поля, по-видимому, падает, поле перестает быть дипольным и становится чрезвычайно знакопеременным и неупорядоченным, возможно в течение нескольких тысяч лет.

2.6. Инверсии дипольного поля

Ранее отмечалось, что повсеместно встречаются породы, NRM которых антипараллельна направлению современного геомагнитного поля. Этот факт можно объяснить двумя способами: или происходила инверсия геомагнитного поля и намагниченность пород зафиксировала это событие, или намагниченность пород подвергалась самообращению. Во втором случае NRM приняла направление, противоположное направлению внешнего магнитного поля, либо во время формирования породы, либо позже. Но возможность инверсий совместима с теорией динамо, а породы, подвергшиеся самообращению, довольно редко наблюдались в лабораторных условиях (Cox et al., 1964). Все это в большой степени свидетельствует в пользу реальности инверсий магнитного поля. Однако наиболее убедительное доказательство дают несколько других наблюдений. В стратиграфической колонке полярность NRM коррелирует с возрастом пород, но не с их минеральным составом. Одновозрастные породы из разных районов земного шара характеризуются NRM одной и той же полярности. Инверсии полярности одновременно «записываются» в породах по всему миру. Обожженная зона контакта в породе почти всегда характеризуется той же полярностью, что и обжигающая ее изверженная порода. Необожженная материнская порода часто обладает NRM, направление которой отличается от направления NRM зоны контакта.

NRM, близкая по направлению к современному полю, называется *нормальной*, а NRM, примерно антипараллельная современному полю,– *обратной*. Сходным образом древнее магнитное поле, северный геомагнитный полюс которого находится в Северном (Южном) полушарии, называется *нормальным (обратным) полем*. Поскольку последнее определение дано относительно соответствующего палеогеографического полюса, а не современного географического полюса, нужно быть осторожным, когда кажущаяся траектория миграции полюса (КТМП) пересекает современный экватор (см. рис. 3.20). Однако для пород моложе девона эта проблема не возникает (Mc Elhinny, 1973) и нет необходимости учитывать ее при рассмотрении последовательностей инверсий.

Наиболее детальная и точная картина последовательности инверсий геомагнитного поля была получена для пород моложе 5 млн. лет, датированных калий-аргоновым (K-Ar) изотопным методом. *Хронологическая шкала полярности* для этого периода (рис. 3.23) делится на четыре *эпохи полярности*, каждая из которых продолжается 700 000 лет или более и включает в себя несколько коротких эпизодов (*ивентов*) *полярности* длительностью от 20 000 до 200 000 лет. Различие между эпохами и ивентами является чисто историческим и не отражает бимодальное распределение интервалов времен между последовательными инверсиями. Когда геомагнитная хронологическая шкала только создавалась и имелись лишь весьма отрывочные палеомагнитные данные,

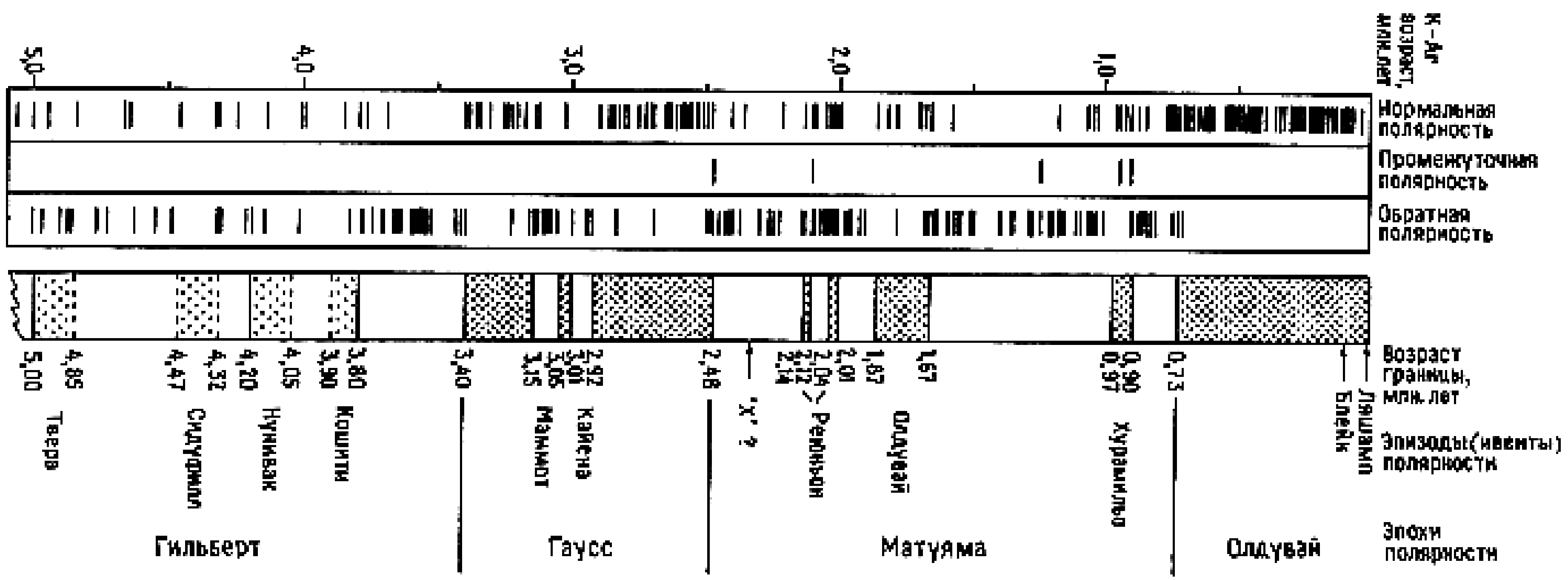


Рис. 3.23. Последовательность инверсий геомагнитного поля и хронологическая шкала полярности для периода 0–5 млн. лет назад. Каждая короткая горизонтальная линия слева указывает возраст, полученный K-Ar-методом, и магнитную полярность по отдельному вулканическому комплексу. Интервалы нормальной (обратной) полярности показаны точками (белым цветом). Стрелками указаны ивенты полярности, которые еще нужно подтвердить глобальными данными (ManKinen, Dalrymple, 1979).

ивенты полярности не были выделены и казалось, что поле меняло знак лишь один раз в миллион лет или около того. Таким образом, эпохи – это более длинные периоды времени, во время которых полярность магнитного поля была преимущественно нормальной (например, эпоха нормальной полярности Брюнес) или преимущественно обратной (например, эпоха обратной полярности Матуяма), а ивенты включают в себя более короткие промежутки времени в пределах эпохи, в продолжение которых полярность была противоположна полярности эпохи. Время между двумя последовательными инверсиями обычно называют *интервалом полярности*, хотя в литературе этот термин используется весьма свободно и иногда применяется также к эпохе.

Если не принимать во внимание те ивенты полярности, которые на рис. 3.23 рассматриваются как сомнительные (например, Ляшамп), то окажется, что инверсии поля за последние 5 млн. лет происходили по крайней мере 23 раза. Длина интервалов полярности меняется от 20 до 730 тыс. лет и в среднем составляет около 217 400 лет. В частности, данные по более древним породам включают в себя перерывы примерно по 100 000 лет; следовательно, быть может, еще будут открыты дополнительные кратковременные инверсии. Однако поле в эпоху Брюнес, несомненно, было преимущественно нормальным, так как плотность использованных данных достаточно высока, и поэтому вряд ли будут открыты какие-либо эпизоды обратной полярности, разве что совсем ничтожное число и очень кратковременные. Поскольку ни один из сомнительных ивентов, показанных на рис. 3.23, не был зарегистрирован по всему земному шару, представляется, что последняя инверсия дипольного поля произошла около 730 000 лет тому назад.

Ивент Ляшамп получил свое название по двум лавовым потокам во Франции возрастом от 8 730 до 20 000 лет – их NRM отклонялась на 158° от нормального направления аксиального дипольного поля (Bonhommet, Zähringer, 1969). Правда, чтобы существование эпизода Ляшамп было окончательно доказано, обратнонамагниченные породы сравнимого возраста должны быть еще найдены в других местах земного шара. Так, например, Денэм и Кокс (Denham, Cox, 1971) изучали магнитную стратиграфию осадочного разреза из озера Моно (Калифорния), предположительный возраст которого от 13 000 до 30 400 лет, и не обнаружили доказательств существования этого эпизода полярности. Однако они выявили смещение (экскурс) поля, начавшееся около 24 600 лет назад и продолжавшееся около 600 лет, во время которого поле, по-видимому, отклонялось в среднем на 25° по наклонению и на 78,5° по склонению от своего нормального направления. Максимальное изменение склонения в этот период составляло 130°, что соответствует средней скорости изменения почти 0,5°/год. Такое быстрое изменение направления поля могло иметь катастрофические последствия для популяции организмов, точная ориентация и навигация которых существенным образом зависят от относительной стабильности направления поля.

Поскольку ивент Ляшамп и экскурс озера Моно, по-видимому, не

являются инверсиями поля, вполне возможно, что они были обусловлены необычайно высокоамплитудными флуктуациями недипольного поля или пониженной напряженностью дипольного поля (см. рис. 3.21), что сделало эффекты недипольного поля более явными. Поэтому существование такого рода ивентов и экскурсов позволяет предположить, что в этом случае динамо-процесс становится временно разупорядоченным.

Для пород, возраст которых превышает 5 млн. лет, точность датировок K-Ar-методом недостаточна для составления надежной хронологической шкалы полярности, основанной на данных по всему земному шару. В настоящее время типичная погрешность K-Ar-датировок составляет ±2% (McDougall, 1979). Следовательно, инверсия, датированная возрастом 5 млн. лет, могла произойти в любое время в пределах 200 000-летнего интервала (период, равный или немного больший, чем 16 из 23 интервалов полярности, показанных на рис. 3.23). Это делает практически невозможным применение K-Ar-метода для корреляции последовательностей инверсий из различных районов. Продление геомагнитной временно́й шкалы за пределы 5 млн. лет назад основано главным образом на отдельных стратиграфических разрезах, сформировавшихся в результате непрерывного осадконакопления в течение длительных периодов времени. Корреляцию данных из различных районов можно проводить с помощью процедуры сопоставления стратиграфических шкал, подобно тому как определяют возраст дерева по годовым кольцам. Для определения возраста некоторых точек на шкале можно тогда использовать различные геологические и палеонтологические реперы. (Иными словами, в связи с глобальной природой инверсий геомагнитного поля магнитостратиграфическая шкала полярности является многообещающей для датировки и корреляции геологических и палеонтологических событий.)

С помощью данных, полученных по океаническим магнитным аномалиям и сходных с теми, которые показаны на рис. 3.12, Хейртцлер и др. (Heirtzler et al., 1968) продлили шкалу полярности до 80 млн. лет назад. Они опирались на общепринятую модель спрединга океанического дна, согласно которой разогретое вещество мантии Земли непрерывно поднимается и выдавливается на поверхность в районе срединно-океанических хребтов и затем расходится в обе стороны от оси хребта со скоростью нескольких сантиметров в год. По мере того как материал остывает и температура его падает ниже точки Кюри, он приобретает намагниченность, параллельную внешнему полю, и над ним фиксируется положительная (отрицательная) магнитная аномалия, если его остаточная намагниченность характеризуется нормальной (обратной) полярностью. Этот процесс в сущности позволяет получить и сохранить непрерывную запись геомагнитной полярности. Для проведения корреляции аномалий из различных районов основные положительные аномалии были идентифицированы и им присвоены номера. На рис. 3.24 показаны аномалии с 1 по 32.

Последовательность инверсий геомагнитного поля, показанная на рис. 3.24, была воссоздана благодаря анализу системы магнитных аномалий, зарегистрированных в северной и южной частях Тихого океана, Южной Атлантике и южной части Индийского океана. С целью создания хронологической шкалы Хейртцлер и др. (Heirtzler et al., 1968)

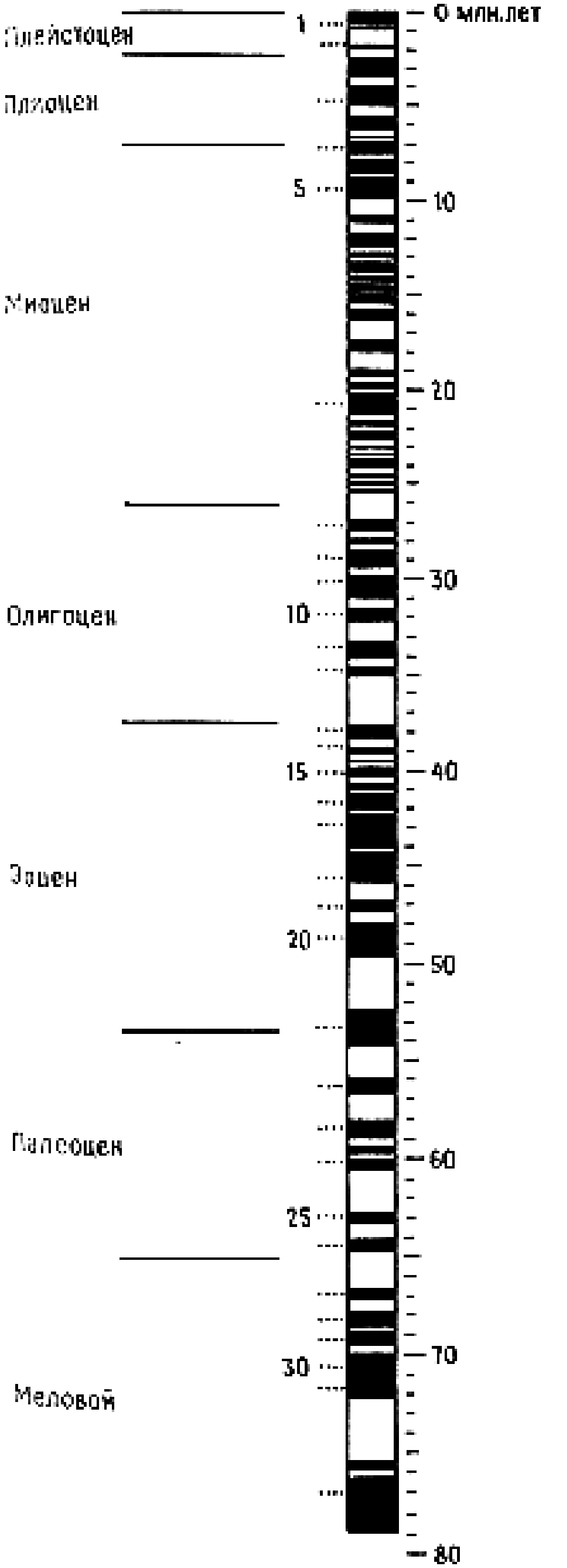


Рис. 3.24. Хронологическая шкала полярности для последних 80 млн. лет, полученная по океаническим магнитным аномалиям. Интервалы нормальной (обратной) полярности показаны черным (белым) цветом. Слева от последовательности инверсий нанесены номера, соответствующие известным аномалиям, а справа дана хронологическая шкала в миллионах лет. Слева указаны геологические периоды (Heirtzler, 1968).

впервые определили среднюю скорость спрединга для верхней части последовательности инверсий, сопоставляя несколько первых полосовых магнитных аномалий, выделенных в океане, с известной шкалой геомагнитной полярности, разработанной для континентов. Используя возраст 3,35 млн. лет для конца эпохи обратной полярности Гильберт (см. 3,4 млн. лет на рис. 23) и считая скорость спрединга постоянной, они путем линейной экстраполяции получили хронологическую шкалу для всей последовательности инверсий. Поскольку опорная граница 3,35 млн. лет экстраполировалась на период времени, почти в 25 раз превышающий ее возраст, было предложено несколько новых вариантов временной шкалы (обзор их см. в работе Butler, Opdyke, 1979). Основной смысл этих ревизий сводится к уменьшению экстраполированной части шкалы Хейртцлера и др. (Heirtzler et al., 1968) примерно на 7%. Это достигается помещением границы между меловым и третичным периодами (65 млн. лет назад) под аномалию 29, а не между аномалиями 26 и 27 (LaBrecque et al., 1977). Это соответствует положению континентальной нормально намагниченной зоны, коррелирующей с полосовой магнитной аномалией 29, относительно границы между меловым и третичным периодами. Конечно, любые возможные отклонения от допущенной постоянной скорости спрединга создают соответствующие искажения в шкале полярности. В связи с такой неопределенностью нужно чрезвычайно осторожно применять шкалы геомагнитной полярности и последовательности инверсий для решения задач стратиграфии, палеонтологии, эволюционной биологии и т. п.

Хотя хронологическая шкала полярности, основанная на океанических магнитных аномалиях, внутренне менее точна, чем позднекайнозойская хронологическая шкала, приведенная на рис. 3.23, она довольно детальна и позволяет получить очень интересное представление о поведении геомагнитного поля за последние 80 млн. лет. Анализ, проведенный Ла Бреком и др. (LaBrecque et al., 1977), показал, что за последние 71,62 млн. лет произошло 188 инверсий, включающих в себя ивенты полярности продолжительностью всего лишь по 10 000 лет. Средняя продолжительность нормального (обратного) интервала полярности составляла 349 000 (412 500) лет. Следовательно, примерно 54,2% времени поле было обратным. Небольшая асимметрия полярности может быть просто артефактом, вызванным неточностью геомагнитной хронологической шкалы, но она может быть и следствием физических процессов, таких как термоэлектрические токи или NRM пород земной коры, которые оказывают влияние на динамо-процесс (Merrill et al 1979). На рис. 3.25 приведена гистограмма, дающая распределение продолжительности интервалов инверсий полярности. Она демонстрирует приблизительно экспоненциальное уменьшение частоты встречаемости более длинных интервалов.

Как показано на рис. 3.24, начиная с аномалии 18, частота инверсий резко возрастает. В соответствии с хронологической шкалой полярности Ла Брека и др. (LaBrecque et al., 1977) между 71,62 и 42,88 млн. лет назад

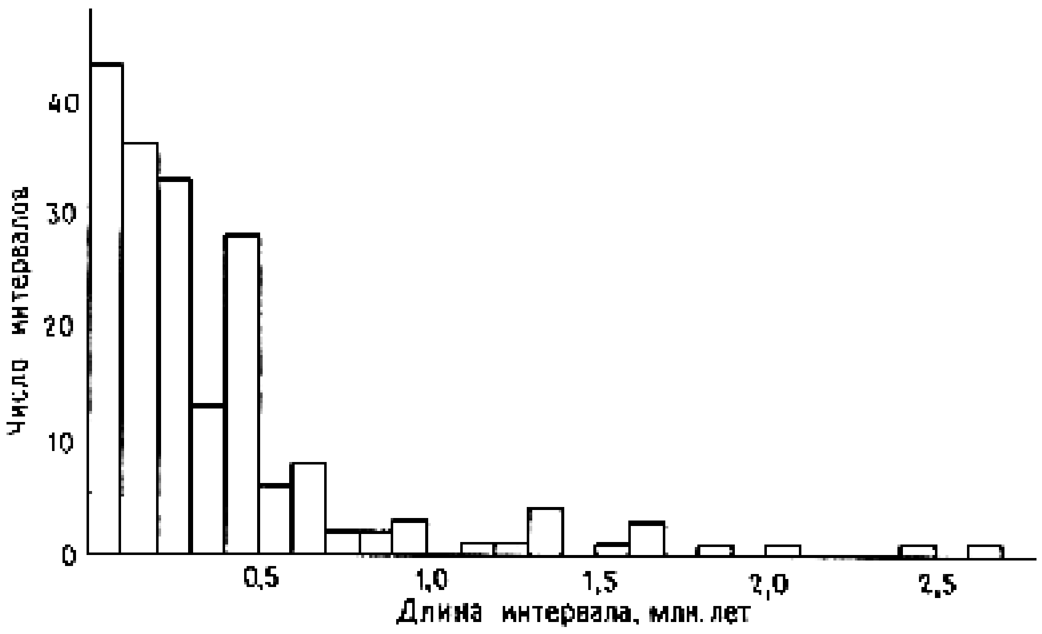


Рис. 3.25. Гистограмма длин интервалов геомагнитной полярности для последних 72 млн. лет, основанная на хронологической шкале полярности ЛаБрека и др. (LaBrecque et al., 1977).

средняя продолжительность интервала полярности составляла около 777 000 лет, а между 42,88 и 5,12 млн. лет (т. е. началом эпохи обратной полярности Гильберт) – 284 000 лет. Приведенная последняя цифра примерно на 30% больше среднего интервала полярности для последних 5 млн. лет, составляющего, согласно данным, приведенным на рис. 3.23, 217 400 лет. Указанное возрастание частоты инверсий за последние 72 млн. лет, вероятно, является реальным, но ее величина скорее всего была преувеличена в связи с невозможностью обнаружить некоторые очень короткие эпизоды полярности океанических аномалий и с уничтожением геологическими процессами некоторых более древних ивентов.

Среднемезозойская хронологическая шкала полярности, разработанная Ларсоном и Хилдом (Larson, Hilde, 1975) по морским магнитным профилям в районе Гавайских островов, показана на рис. 3.26. Согласно этим и некоторым другим результатам, в меловом и юрском периодах преобладала нормальная геомагнитная полярность. Существование длительной меловой нормальной зоны – периода практически ненарушенной нормальной полярности – примерно от 110 до 80 млн. лет назад (рис. 3.24 и 3.26) установлено достаточно надежно. Однако противоречивые палеомагнитные данные оставляют неразрешенным вопрос о преобладании прямой или обратной полярности в юрский период (Chan, Alvarez, 1983). Вообще говоря, хронологическая шкала полярности до мелового периода известна плохо и останется такой еще долгое время. Современные обзоры данных о магнитостратиграфической хронологической шкале читатель может найти в работах Cox, 1983, и Chan, Alvarez, 1983.

Макелинни (McElhinny, 1971) выдвинул предположение, что об от-

носительной частоте инверсий можно судить и не имея сведений о последовательности инверсий. Для этого просто нужно знать относительное содержание пород заданного возраста со смешанной (т.е. как нормальной, так и обратной) NRM. На рис. 3.30 процентное отношение результатов измерений пород со смешанной полярностью, полученных по мировым палеомагнитным данным, показано как функция геологического возраста. Особый интерес представляют очень низкие частоты инверсий для силура и верхнего карбона. Последний минимум соответствует спокойному интервалу Киама (или пермокарбоновому) – периоду, который охватывал всю пермь и верхний карбон и в течение которого произошло всего несколько инверсий геомагнитного поля. Наличие одного и того же интервала обратной полярности по палеомагнитным данным, полученным в СССР, Северной Америке и Австралии, свидетельствует о его реальности (McElhinny, 1969). Обзор палеомагнитных

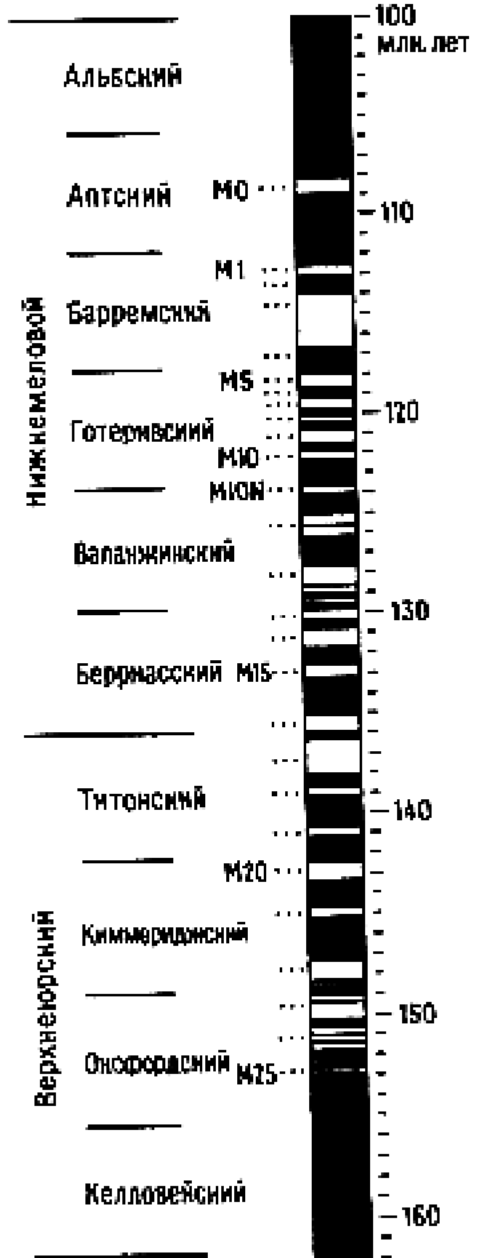


Рис. 3.26. Среднемезозойская шкала полярности, полученная по океаническим магнитным аномалиям. Интервалы нормальной (обратной) полярности показаны черным (белым) цветом. Слева дана магнитостратиграфическая характеристика (Larson, Hilde, 1975).

данных, выполненный в работе Irving, Pullaiah, 1976, позволяет считать, что интервал Киама длился от 313 до 227 млн. лет назад.

В связи с немногочисленными палеомагнитными данными по докембрию и проблемой определения полярности по отношению к плохо известной кажущейся траектории миграции полюса достоверная последовательность докембрийских инверсий пока еще не получена. Однако, согласно Макелинни (McElhinny, 1973), 25% из 126 измерений полярности по доступным докембрийским образцам были смешанными, что сравнимо с 29% смешанной полярности по фанерозою. Отсюда Макелинни пришел к выводу, что частота инверсий в докембрии и фанерозое была сходной. Он обнаружил также, что из 1231 палеомагнитного результата, охватывающего весь фанерозой, 54,1% были обратной полярности.

Эта цифра удивительно хорошо согласуется со значением 54,2% для времени, в течение которого поле имело обратную полярность: данная оценка была получена по данным Ла Брека и др. (LaBrecque et al., 1977) для последних 72 млн. лет.

2.7. Смена полярности – что происходит во время инверсии?

В принципе при инверсии дипольного геомагнитного поля может сохраняться либо направление вектора поля при уменьшении его напряженности до нуля с последующей ориентацией поля в противоположном направлении, либо величина напряженности при повороте вектора на 180°. Другая возможность – нарушение динамо-процесса, в результате которого дипольное поле становится неупорядоченным и недипольным, а после того как процесс восстановится, создается новое дипольное поле противоположного знака. Очевидно, любой из этих процессов мог иметь серьезные глобальные последствия для тех видов живых организмов, которые так или иначе зависят от устойчивого геомагнитного поля. Во всяком случае каждый из упомянутых процессов влечет за собой значительную потерю информации об ориентации магнитного поля во время инверсии.

К сожалению, теория динамо развита еще крайне недостаточно, поэтому невозможно сделать какой-либо определенный выбор между этими двумя альтернативами. Поэтому мы должны обратиться к палеомагнитной записи, которая из-за своей фрагментарности пока еще не позволяет нам сделать однозначных выводов. Читатель уже мог убедиться в том, что инверсия происходит относительно быстро. Теоретически рассчитанное время распада магнитного поля в земном ядре составляет всего лишь несколько тысяч лет. Продолжительность ивентов полярности (которые разделяют две инверсии), составляющая около 10 000 лет, находится в соответствии с этой оценкой. Такого рода переходный процесс вряд ли мог найти отражение в изверженных

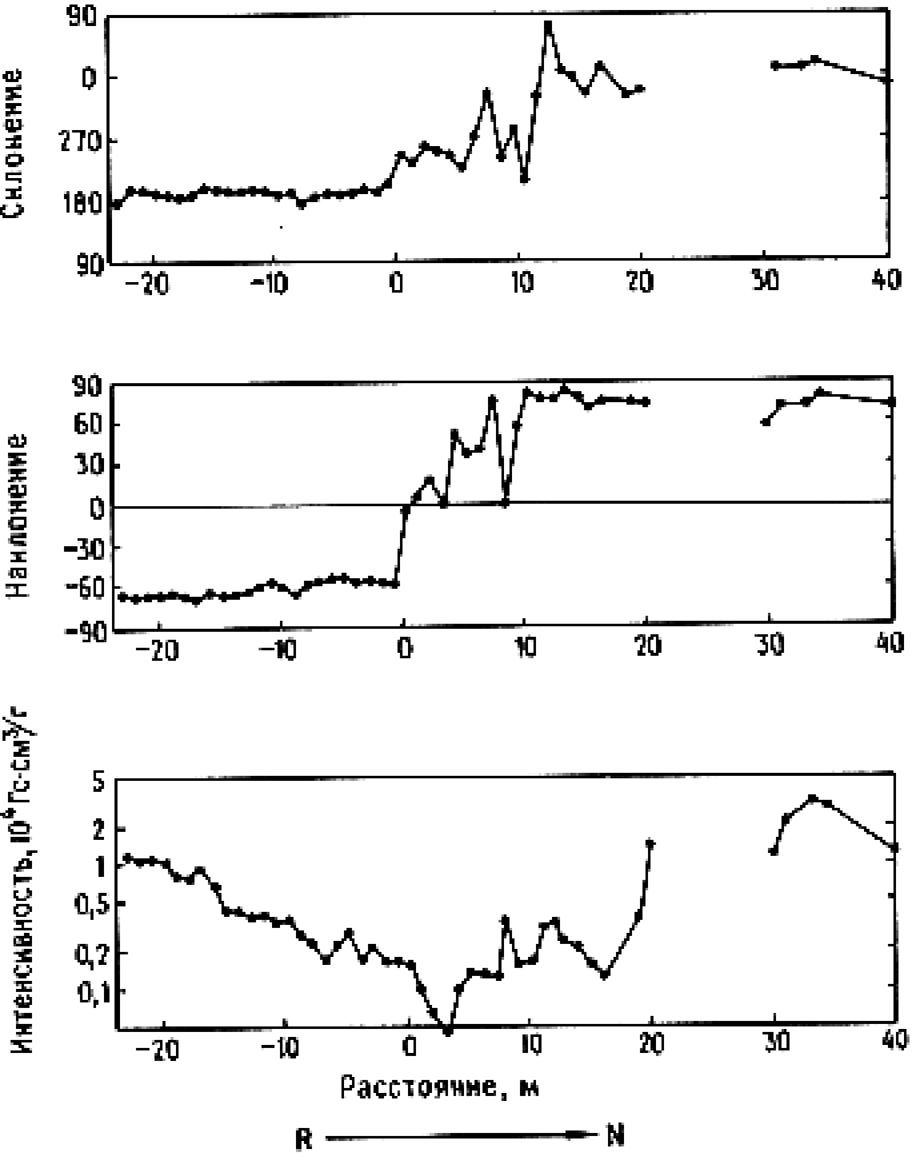


Рис. 3.27. Палеомагнитная запись перехода полярности от обратной (R) к нормальной (N), полученная по позднетретичной интрузии изверженных пород. По оси абсцисс показано расстояние в образце от средней точки инверсии (I = 0). Склонение и наклонение даны в градусах. Интенсивность NRM (после чистки) показана в нижней рамке. Каждая точка представляет собой среднее значение из нескольких измерений для 1-метрового разреза (Fuller et al., 1979).

породах или оказаться достаточно подробно зафиксированным в осадочных породах при относительно медленных процессах седиментации. Тем не менее палеомагнитологам удалось зарегистрировать несколько переходов полярности. Хотя качество этих «записей» различно, они все же дают возможность получить грубое представление о том, что происходит во время инверсии. Потребуется еще много лет, прежде чем исследователи смогут воссоздать полную картину какой-либо инверсии, поскольку запись этой инверсии должна быть получена по разным районам. Еще больше времени потребуется для того, чтобы определить, насколько эта картина типична для инверсий вообще.

Обзор палеомагнитных записей для периодов перехода полярности

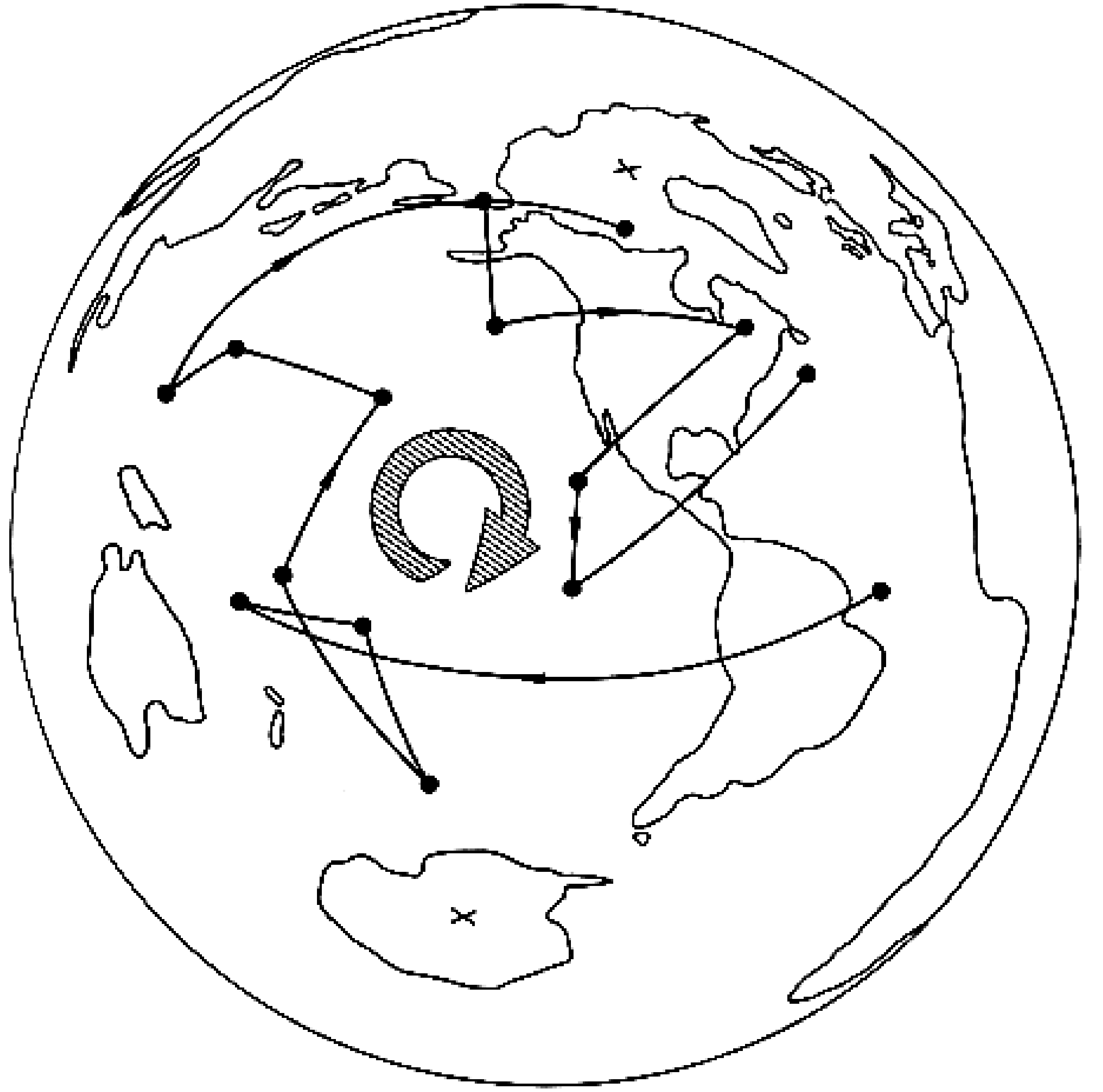


Рис. 3.28. Траектория ВГП, построенная по двухметровому разрезу при действительном изменении полярности (*I* проходит через 0), показанном на рис. 3.27. Крестики – географические полюса (Fuller et al., 1979).

дается в работе Фуллера и др. (Fuller et al., 1979). Здесь же достаточно будет ограничиться общим феноменологическим описанием процесса инверсии на основе современных палеомагнитных данных. На рис. 3.27 и 3.28 показаны полученные по изверженной интрузии палеомагнитные записи инверсии, происходившей в позднетретичное время. Они помогут читателю наглядно представить себе природу процесса инверсии. Поскольку каждая точка на рис. 3.27 соответствует среднему значению, найденному для 1-метрового разреза, здесь мы видим сглаженную картину поведения поля до, во время и после изменения полярности. На рис. 3.28 демонстрируется несглаженная картина 2-метрового разреза переходной зоны.

Во время инверсии поле не остается дипольным (Hillhouse, Cox, 1976).

но и не уменьшается до нуля[1]. Очевидно, величина напряженности дипольной компоненты уменьшается и становится меньше напряженности недипольной компоненты, тогда как последняя практически не меняется и определяет геометрию поля в этот переходный период. Хотя множество данных свидетельствует о том, что величина полного вектора поля во время инверсии уменьшается, возможно, до 10% ее нормальной величины (Opdyke et al., 1973; Dodson et al., 1978), есть и доказательства того, что локально или на протяжении коротких промежутков времени величина напряженности может оставаться довольно высокой (Prevot, 1977; Shaw, 1977). Процесс преобразования полярности продолжается примерно 4000–5000 лет (Harrison, Somayajulu, 1966; Opdyke et al., 1973), и уменьшение величины напряженности может либо совпадать с ним (Opdyke et al., 1973), либо длиться в два-четыре раза дольше (Hillhous, Cox, 1976; Dodson et al., 1978; рис. 3.27).

По мере уменьшения напряженности дипольного поля и возрастающего разупорядочения главного поля направления локального поля характеризуются значительной дисперсией и меняются гораздо быстрее. Во время самой инверсии полярности (в интервале от −1 до 10 м на рис. 3.27) эти флуктуации резко возрастают по абсолютной величине (рис. 3.28), в результате чего возникает вековая вариация, сходная с вековой вариацией, наблюдаемой в историческое время, но характеризующаяся гораздо более высокой амплитудой (ср. рис. 3.6 и 3.17). Хотя переходное поле чрезвычайно неупорядоченно, назвать его совершенно хаотичным, очевидно, нельзя. Скорее всего его можно охарактеризовать как преимущественно квадрупольное или октупольное (Hoffman, Fuller, 1978).

2.8. Каковы причины инверсий?

При изучении такого глобального явления, как инверсия магнитного поля Земли, кажется естественным связывать причину его возникновения с каким-то экзотическим явлением. И действительно, предполагалось, что две последние инверсии поля были вызваны ударом кометы или метеорита (Glass, Heezen, 1967; Durrani, Kahn, 1971). Однако, даже если какое-либо катастрофическое событие могло нарушить процесс геодинамо в такой степени, чтобы вызвать инверсию, в настоящее время становится все более очевидно, что нет необходимости и, вероятно, даже было бы неправильно искать причины инверсии вне самого механизма динамо.

Мы уже отмечали, что лабораторное динамо Лоуса–Уилкинсона демонстрирует спонтанные изменения направлений поля после периодов стабильности. Результаты изучения солнечных пятен свидетельствуют о том, что через каждые 11 лет происходят инверсии солнечного магнитного поля. Кроме того, аналитически было показано, что токи в системе, состоящей из двух дисковых динамо, где стационарный тороидальный контур каждого из дисков создает магнитное поле другого, подвержены апериодическим инверсиям (Rikitake, 1958; Mathews, Gardner, 1963). Стохастическая инверсионная модель Кокса (Cox, 1968, 1969) основывается лишь на том предположении, что инверсии происходят в результате взаимодействия недипольного поля аномальной напряженности с дипольным полем низкой напряженности. Теперь уже стало очевидным, что нелинейные физические системы, среди которых геодинамо является лишь одним из примеров, как правило, характеризуются апериодическим хаотическим поведением (Busse, 1983). Отсюда можно сделать вывод о том, что инверсии являются свойством, присущим геодинамо, и их возникновение вовсе не обусловлено какими-то внешними причинами.

С другой стороны, изменения в поведении геомагнитного поля за длительные периоды времени в настоящее время рассматриваются как результат изменений в условиях работы динамо (McElhinny, 1979; Busse, 1983). С качественной точки зрения можно провести аналогию между движениями жидкости в земном ядре и метеорологическими явлениями (см., например, Cox, 1975). Движения, обусловливающие возникновение вековых вариаций геомагнитного поля, соответствуют крупномасштабным метеорологическим явлениям, таким как ураганы и перемещение областей высоких и низких давлений по земному шару, тогда как изменения механизма динамо, происходящие в течение длительного периода времени, соответствуют климатическим изменениям. В результате предполагается, что относительно резкие изменения частоты инверсий, усредненные по длительным периодам времени (10–100 млн. лет), отражают изменения граничных условий режима работы динамо. К ним относятся, например, изменения в поступлении энергии или нарушение геометрии либо физической природы поверхности земного ядра. В частности, заманчивым представляется предположение о связи поведения геодинамо за длительный период времени с конвективными движениями в мантии и, следовательно, с дрейфом континентов. Джекобс (Jacobs, 1981) считает, что существует определенная зависимость между изменениями теплового потока и частотой инверсий, а Фогт (Vogt, 1975) нашел, что изменения частоты инверсий, по-видимому, совпадали с крупными тектоническими событиями около 110–120, 70–80 и 42–45 млн. лет назад (см. рис. 3.24 и 3.26). Совсем недавно Форс (Force, 1984) заметил, что геологическая летопись содержит большое количество данных, свидетельствующих о связи между инверсиями поля, скоростью спрединга дна океана и климатом.

[1] Частое использование траекторий ВГП при описании инверсий поля еще не означает, что поле является дипольным в ходе изменения полярности. Это просто позволяет характеризовать изменение направления поля в данной точке и сравнивать записи по разным районам.

2.9. Инверсии поля и филогенетические изменения

В 1963 г. вскоре после того, как были открыты окружающие Землю пояса частиц с высокой энергией, захваченных геомагнитным полем (Van Allen, 1959), и твердо установлено существование инверсий геомагнитного поля (Jacobs, 1963), Аффен (Uffen, 1963) опубликовал в журнале "Nature" заметку с интригующим названием «Влияние земного ядра на происхождение и эволюцию жизни». Аффен выдвинул предположение о том, что до того, как информация о земном ядре достигла поверхности и развилась геомагнитная защита, поверхность Земли подвергалась непрерывному воздействию «стерилизующей космической радиации», которая тормозила биогенез.

После формирования ядра и последующей органической эволюции инверсия поля должна была бы привести к падению потока частиц на земную поверхность и дала бы возможность солнечному ветру (см. следующий раздел) и космическому излучению достигать поверхности Земли, в результате чего живые организмы подвергались бы воздействию ионизирующего излучения большой интенсивности. Скорости мутаций стали бы возрастать, и, следовательно, темпы эволюции частично определялись бы частотой инверсий геомагнитного поля и условиями в земном ядре.

Гипотеза Аффена была быстро отвергнута (Sagan, 1965; Black, 1967; Waddington, 1967; Harrison, 1968). Как показали количественные оценки, в период инверсий поля космическая радиация на земной поверхности может возрасти только на 10–15%, что лишь немного превышает увеличение ее на 10% от экватора до полюсов. При таком незначительном повышении уровня радиации едва ли можно ожидать значительного изменения скорости мутаций.

Однако в то же время благодаря изучению глубоководных колонок грунта было накоплено значительное количество данных, свидетельствующих о том, что эпохи вымирания или возникновения различных видов морской микрофауны совпадают с инверсиями магнитного поля (Harrison, Funnel, 1964; Opdyke et al., 1966; Watkins, Goodell, 1967; Hays, Opdyke, 1967, Hays et al., 1969; Kennett, Watkins, 1970; Hays, 1971). Так, например, по различным океанам из восьми видов радиолярий, вымерших за последние 2,5 млн. лет, шесть видов исчезли из ископаемых остатков во время возникновения инверсий (рис. 3.29), а из восьми видов вымерших фораминифер семь также исчезли во время инверсий. Важно отметить, что палеонтологические данные и магнитные «записи» были получены для одних и тех же колонок и поэтому указанные корреляции не были связаны с низкой точностью датировки.

Симпсон (Simpson, 1966) проверил утверждение Аффена о том, что скорости эволюции должны зависеть от частоты инверсий, сопоставив скорости видообразования с встречаемостью обратнонамагниченных

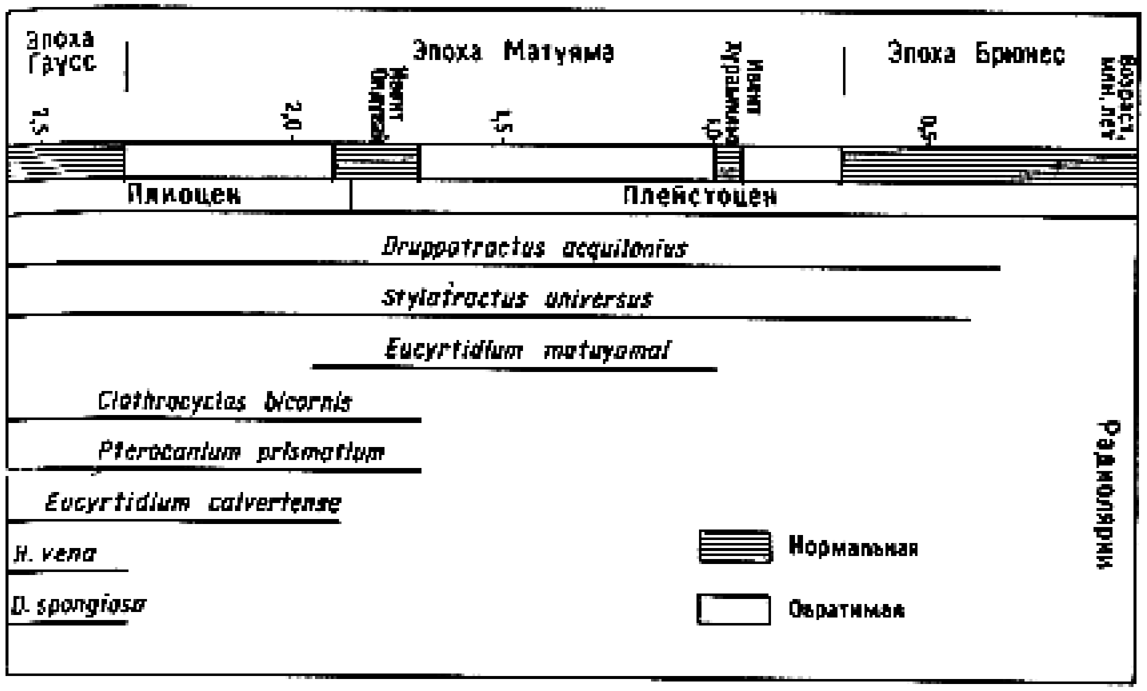


Рис. 3.29. Последовательность геомагнитных полярностей для последних 2,5 млн. лет и палеонтологические данные по восьми видам радиолярий, вымерших за этот период (Hays, 1971).

горных пород. Однако, как показал Макелинни (McElhinny, 1973), такого рода сопоставление не решает вопрос, поскольку, как ясно показывает изучение интервала Киама, частая встречаемость обратнонамагниченных пород еще не означает, что и инверсии происходили часто. Макелинни сравнил частоту инверсий в фанерозое с появлением новых и вымиранием существующих семейств (рис. 3.30) и пришел к выводу об отсутствии значимой корреляции, поскольку максимум филогенетического изменения совпадает как с максимумом, так и с минимумом скоростей инверсии. Однако, поскольку инверсии геомагнитного поля не являются единственным фактором, воздействующим на скорости эволюции, едва ли можно ожидать хорошей корреляции. Кроме того, судя по данным, приведенным на рис. 3.30, нельзя сказать, что скорости эволюции и частота инверсий совершенно не связаны между собой. Особенно интересны совпадения минимумов филогенетических изменений с зонами спокойного магнитного поля в силуре и верхнем карбоне. Не меньший интерес представляет «вспышка» вымирания видов в конце пермского периода. Ссылаясь на значительное увеличение вымирания видов в конце пермского и мелового периодов, Хейс (Hays, 1971) предположил, что наличие продолжительных периодов времени с низкой частотой инверсий могло способствовать распространению видов, на которые геомагнитные инверсии действовали неблагоприятно.

С учетом этих корреляций вопрос о природе связи между инверсиями поля и филогенетическим изменением возникает вновь. Полагая, что эти связи не случайны, можно предложить три возможных объяснения наблюдаемых корреляций: 1) некое негеомагнитное событие привело

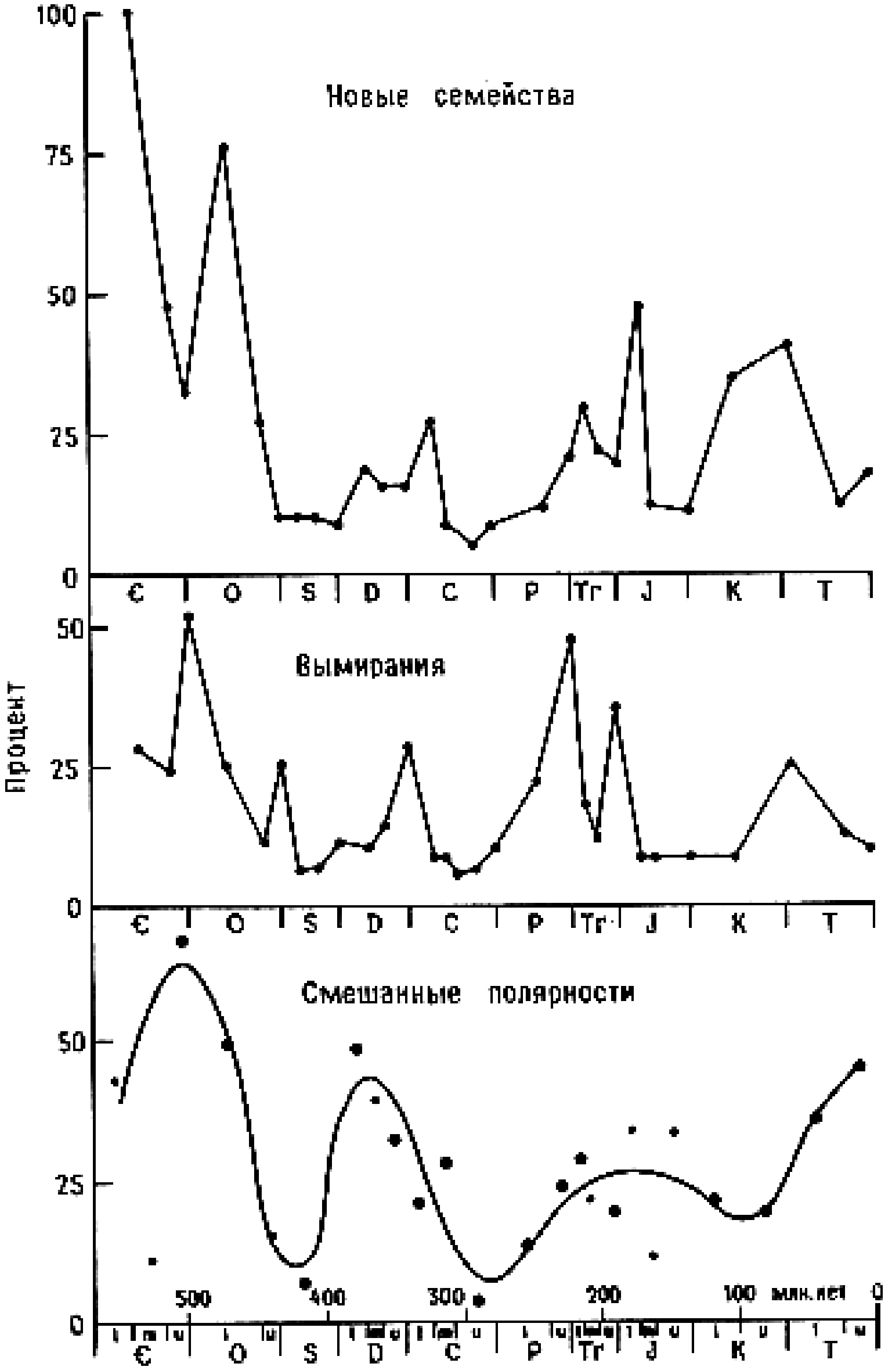


Рис. 3.30. Сравнение скоростей возникновения и вымирания фаунистических семейств, выраженное в процентах от существующих семейств (по данным Ньюелла - Newell, 1963), с относительными частотами инверсий в фанерозое, выраженными в процентах пород конкретной геологической эры, содержащих признаки смешанных (как обратной, так и нормальной) палеомагнитных полярностей (McElhinny, 1973).

независимо к изменению фауны и к инверсии поля; 2) инверсии существенно влияли на немагнитную среду, окружающую организмы; 3) изменения характера геомагнитного поля во время инверсий непосредственно воздействовали на организмы. Конечно, любая из этих возможностей могла действовать в совокупности с одной или двумя другими. Кроме того, тот факт, что отдельные виды смогли пережить несколько инверсий, указывает на то, что инверсия, совпадающая с вымиранием или видообразованием, не являлась единственной причиной филогенетического изменения. Она могла просто помочь перевесить чашу весов для тех видов, которые уже находились под сильным давлением со стороны других факторов отбора, совершенно не связанных с инверсиями.

Изучая глубоководные колонки образцов из Антарктиды, Кеннетт и Уоткинс (Kennett, Watkins, 1970) отметили, что с изменениями микрофауны часто совпадали как геомагнитные инверсии, так и максимумы вулканической активности. Если в атмосферу выбрасывалось достаточно большое количество вулканического пепла, что уменьшало инсоляцию земной поверхности и вызывало изменение климата, тогда вулканизм, а не инверсия поля мог быть причиной изменений фауны. Точно так же возможная связь между процессами в ядре, тектоническими событиями и климатом, отмеченная ранее (Vogt, 1975; Force, 1984), наводит на мысль о том, что инверсии поля и изменения фауны могли совпадать просто потому, что имели одну и ту же общую первопричину. Дюррани и Кан (Durrani, Kahn, 1971) предложили другой, чисто умозрительный сценарий. Если инверсия поля была вызвана ударом кометы, то изменения фауны могли быть связаны с выделением кометой больших количеств таких газов, как метан и аммиак.

В качестве альтернативы гипотезы Аффена Харрисон (Harrison, 1968) предположил, что инверсия поля вызывала изменения климата, возможно посредством увеличивающейся ионизации верхних слоев атмосферы. Некоторые данные, свидетельствующие об изменениях климата во время инверсий, были обнаружены в глубоководных колонках. Однако не все инверсии сопровождаются свидетельствами изменения климата (Hays, Opdyke, 1967; Hays et al., 1969). Хотя предположение Харрисона весьма интересно (Wollin et al., 1973; King, 1974), влияние геомагнитного поля на климат не доказано.

Сравнительно недавно Сискоу и др. (Siscoe et al., 1976) и Рейд и др. (Reid et al., 1976) выдвинули гипотезу, которая по существу является модификацией оригинальной гипотезы Аффена. Увеличение потока заряженных частиц в верхних слоях атмосферы во время инверсии могло вызвать катастрофическое уменьшение стратосферного озона и привести к увеличению ультрафиолетовой радиации на поверхности Земли. Рейд и др. (Reid et al., 1976) подсчитали, что во время инверсии солнечные возмущения могут также воздействовать на климат или значительно уменьшать фоновый уровень интенсивности видимой радиации в диапазоне 400–500 нм.

Хейс (Hays, 1971) показал, что инверсии могли повлиять не только на уровень радиации и климат, но и непосредственно на живые организмы вследствие их чувствительности к магнитным полям. Однако в то время

экспериментальные данные относительно биологического эффекта слабых магнитных полей были довольно неясны, часто противоречивы и в значительной степени ограничены изучением беспозвоночных (например, Düll, Düll, 1935; Barnwell, Brown, 1961; Palmer, 1963; Barnothy, 1969). Поэтому гипотеза Хейса не была принята во внимание.

Но, как ясно показано в этой книге, гипотезу Хейса следует рассмотреть вновь. За последнее десятилетие накоплено значительное количество данных, которые не только подтверждают чувствительность организмов к геомагнитному полю, но и не исключают способности многих организмов воспринимать пространственно-временную информацию, содержащуюся в магнитном поле. С одной стороны, существуют организмы, электрическая чувствительность которых достаточно высока для того, чтобы обнаруживать слабые электрические поля, индуцированные при их движении в геомагнитном поле (Kalmijn, 1974). Другие организмы, по-видимому, реагируют непосредственно на магнитные поля, так как индуцированные в результате движения электрические поля не могут объяснить поведение голубей с прикрепленными к спине или голове магнитами или катушками, по которым течет ток (Keeton, 1971, Walcott, Green, 1974). Невозможно объяснить этим и ориентационные реакции медленно движущихся бактерий (Blakemore, 1975) и саламандр (Phillips, 1977) на магнитные поля. Кроме того, способность скатов различать слабые экспериментально созданные электрические поля и поля, индуцированные при движении (Kalmijn, 1982), позволяет предположить, что скаты обладают как электрической, так и магнитной чувствительностью.

Некоторые аспекты накопленных данных о биологических эффектах слабых магнитных полей представляют особый интерес для проблемы инверсий поля и филогенетических изменений. Во-первых, твердые доказательства получены для самых разных таксонов: бактерий (Blakemore, 1975), насекомых (Lindauer, Martin, 1972), рыб (Kalmijn, 1978; Quinn et al., 1981), амфибий (Phillips, 1977) и птиц (Keeton, 1974). Если учесть также нечеткие и косвенные доказательства, в список войдут еще жгутиковые (Palmer, 1963) и другие простейшие, а также плоские черви (Brown, 1962), улитки (Barnwell, Braun, 1961) и млекопитающие (Zoeger et al., 1981). Во-вторых, множество данных имеет отношение к ориентации и миграции, т.е. к тем видам поведения, которые часто являются критическими для выживания и размножения. Имеются сообщения, что даже небольшие естественные возмущения геомагнитного поля воздействуют на ориентацию и миграцию (Keeton et al., 1974, Moore, 1977). В-третьих, существуют некоторые экспериментальные данные (Bliss, Heppner, 1976; Martin, Lindauer, 1977) и довольно обоснованная гипотеза (Brown, 1976), что геомагнитная суточная вариация помогает при синхронизации циркадианных ритмов. Наконец, Френкель и др. (Frankel et al., 1981) обнаружили, что доля магнитотаксических бактерий в популяции, ориентирующихся на север и на юг, зависит от наклонения внешнего магнитного поля.

Эволюционные аспекты этих данных более или менее очевидны. Ухудшение качества и стабильности геомагнитной информации во время инверсий могло быть катастрофическим для популяций, нуждающихся в надежной информации для ориентации и навигации. Увеличение интенсивности геомагнитных возмущений при уменьшении напряженности магнитного поля (см. Siscoe et al., 1976) будет воздействовать также на виды, нуждающиеся в магнитной информации для своей ориентации, и может приносить вред большому числу видов, нарушая ход их биологических часов. Не исключено, что это не единственный способ, с помощью которого геомагнитные инверсии влияют на эволюцию, – он просто наиболее очевиден в свете имеющихся на сегодняшний день данных. Слабость наблюдаемых эффектов часто ставила в тупик исследователей биомагнетизма. Но если судить о будущем по опыту последнего десятилетия, то, видимо, усовершенствованная методика экспериментов и улучшенная аппаратура, а также растущее число исследований – все это приведет к открытию многочисленных менее очевидных, но более эффективных способов, с помощью которых геомагнитные явления могли бы непосредственно воздействовать на эволюцию органического мира.

3. Поле внешнего происхождения

3.1. Солнечный ветер и магнитосфера

Солнечный ветер – это поток заряженных частиц, главным образом протонов и электронов, постоянно движущихся от Солнца во всех направлениях. Поскольку этот поток обтекает Землю, геомагнитное поле оказывается ограниченным в пространстве вполне определенной областью, называемой *магнитосферой*, которая по форме напоминает комету с хвостом, направленным от Солнца (рис. 3.31). Резкая граница магнитосферы называется *магнитопаузой*. Двигаясь со скоростью 300–700 км/с, солнечный ветер является «сверхзвуковым» потоком по отношению к распространяющимся в нем магнитогидродинамическим волнам. При столкновении с магнитосферой солнечный ветер образует стационарную головную ударную волну, которая отстоит от подсолнечной стороны магнитопаузы на расстояние трех-четырех земных радиусов (один земной радиус = $1R_E \approx 3670$ км). После прохождения через фронт ударной волны спокойный поток солнечного ветра становится нерегулярным, обтекая магнитосферу. Некоторые частицы солнечного ветра, проникая сквозь магнитопаузу, захватываются геомагнитным полем.

Солнечный ветер взаимодействует с магнитосферой таким образом, что геоцентрическое расстояние до подсолнечной точки магнитопаузы обычно составляет около 11 R_E. В сторону, противоположную Солнцу, хвост магнитосферы простирается за пределы орбиты Луны, возможно

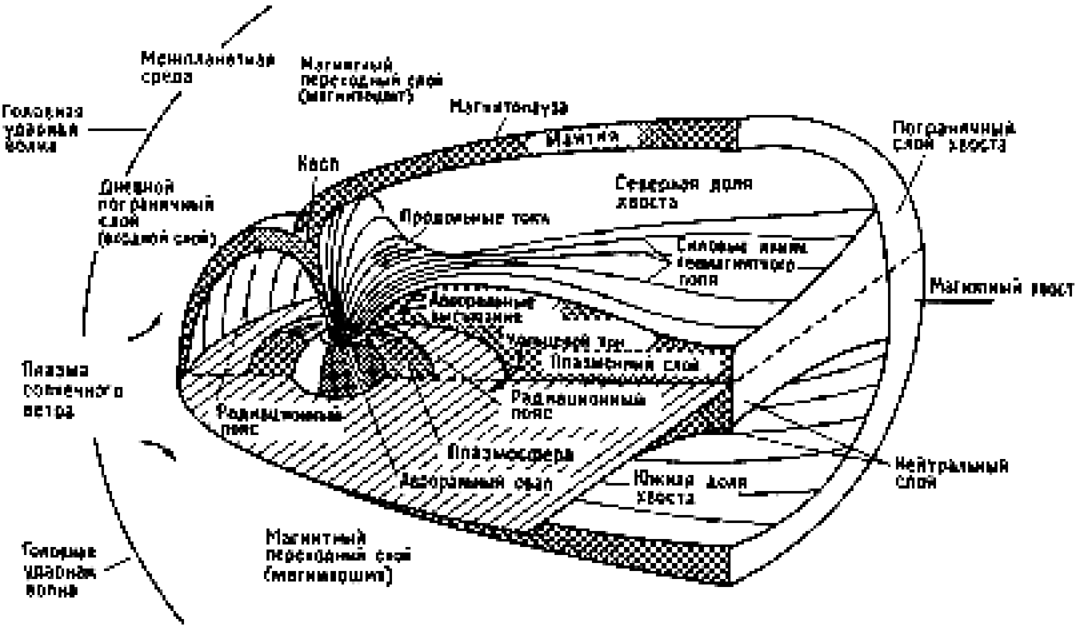


Рис. 3.31. Взаимодействие магнитосферы с солнечным ветром (Friedman, 1983; оригинал принадлежит Дж. Редереру).

до 1000 R_E. Время от времени солнечные вспышки возмущают солнечный ветер, испуская облака протонов высоких энергий, которые проносятся сквозь солнечный ветер и местами изменяют его скорость и плотность. Более интенсивные возмущения могут сжимать подсолнечную магнитопаузу до 5 R_E (Roederer, 1974). Сискоу и др. (Siscoe et al., 1976) подсчитали, что во время инверсии геомагнитного поля магнитопауза может понизиться примерно до 2 R_E.

Как мы уже отмечали, анализ методом Гаусса [уравнение (9)] показывает, что небольшая часть геомагнитного поля связана с источниками, расположенными вне Земли. Такими источниками являются электрические токи в ионосфере – области, простирающейся от высоты ~ 80 км до внешней границы верхней атмосферы и состоящей из заряженных частиц, либо захваченных из солнечного ветра и космического излучения, либо созданных ионизацией атомов и молекул верхней атмосферы солнечной радиацией высокой энергии. Токи – это крупномасштабные потоки ионосферных частиц, создаваемые электрическими и механическими силами, интенсивность которых зависит от плотностей и средних скоростей потока этих частиц. Основными токами, представляющими здесь интерес, являются: 1) *атмосферное динамо* – токи, текущие на высоте порядка 100 км и возникающие вследствие приливных движений ионосферы под действием солнечных и лунных гравитационных сил или солнечного нагрева ионосферы; 2) *кольцевой ток* – поток захваченных геомагнитным полем протонов, направленный с востока на запад и сосредоточенный вокруг геомагнитного экватора на среднем геоцентрическом расстоянии порядка $6R_E$; 3) токи на магнитопаузе.

Изменения в конфигурации или интенсивности любой из этих систем токов будут создавать соответствующие изменения в геомагнитном поле

на земной поверхности. Они имеют временные масштабы, колеблющиеся от секунд до десятков лет и более. Очень короткопериодные явления (периоды от менее секунды до нескольких минут) называют *геомагнитными микропульсациями*. Они вызваны различными причинами, такими как бомбардировка ионосферы заряженными частицами, магнитогидродинамические волны в магнитосфере и резонансы в полостях магнитосферы. Как правило, их амплитуды меньше 1 нТл, но иногда длиннопериодные пульсации имеют амплитуды до 1000 нТл, особенно в полярных районах. Их амплитуды и частоты испытывают как суточные, так и сезонные вариации. Детальный обзор микропульсаций приведен в работе Campbell, 1967, и больше здесь мы их рассматривать не будем. Калмийн (Kalmijn, 1974) проанализировал потенциальную роль микропульсаций для электрочувствительных организмов.

В целом можно ожидать существования геомагнитных явлений с периодичностями, соответствующими любому из известных геофизических и солнечных циклов, такому, как средние солнечные (24 часа) и лунные (24 часа 50 мин) сутки, синодический месяц (29,5 сут), период вращения Солнца (~ 27 сут), тропический год (365,24 сут) и цикл солнечной активности (11 лет). Геомагнитные вариации с такими периодами наблюдались довольно часто. Кроме того, интенсивные апериодические возмущения, продолжающиеся от минут до многих часов, возникают при солнечных вспышках (*магнитные бури*) и других солнечных возмущениях или при внезапном высвобождении магнитной энергии из хвоста магнитосферы (*магнитные суббури*). Литература по магнитосферным возмущениям весьма обширна, и для рассмотрения этих явлений читатель может обратиться к работам Chapman, Bartels, 1940, Matsushita, Campbell, 1967, Ratcliffe, 1972 и McPherron, 1979. Здесь мы остановимся только на наиболее важных особенностях этих явлений, которые имеют очевидные биомагнитные следствия.

В заключение следует отметить, что геомагнитные вариации ионосферного происхождения, главным образом те, которые имеют временную шкалу порядка часов, индуцируют электрические токи в земной коре и мантии. Эти токи, называемые *теллурическими токами*, вносят вклад во внутренние источники геомагнитного поля (Price, 1967). В большинстве случаев индуцированные поля могут быть весьма значительными вблизи побережий и аномалий проводимости твердой Земли. Наибольшее влияние испытывают амплитуды временных вариаций вертикальной компоненты Z: в экстремальных случаях они могут увеличиваться или уменьшаться примерно на порядок (см. Rikitake, 1964).

3.2. Спокойные солнечная и лунная суточные вариации

В каждом месяце имеется несколько случайно распределенных дней, когда магнитные элементы в данном районе обнаруживают особенно

плавные вариации с периодами, соответствующими продолжительности солнечных суток. Такие дни называются *геомагнитно-спокойными*, а эти вариации в целом называются *спокойной солнечно-суточной вариацией* S_q. S_q является результатом прохождения токов, создаваемых атмосферным динамо под воздействием Солнца. Эти токи наиболее интенсивны на солнечной стороне ионосферы, что связано с нагревом и ионизацией. Поскольку продолжительность действия и интенсивность солнечного света варьируют в зависимости от широты и времени года, соответственно изменяется амплитуда S_q (рис. 3.32 и 3.33). Вследствие неравномерного распределения континентов и океанов в S_q наблюдаются также долготные вариации и асимметрии по полушариям. Интенсивность S_q в среднем составляет около 50 нТл (сравните с 50 000 нТл главного поля),

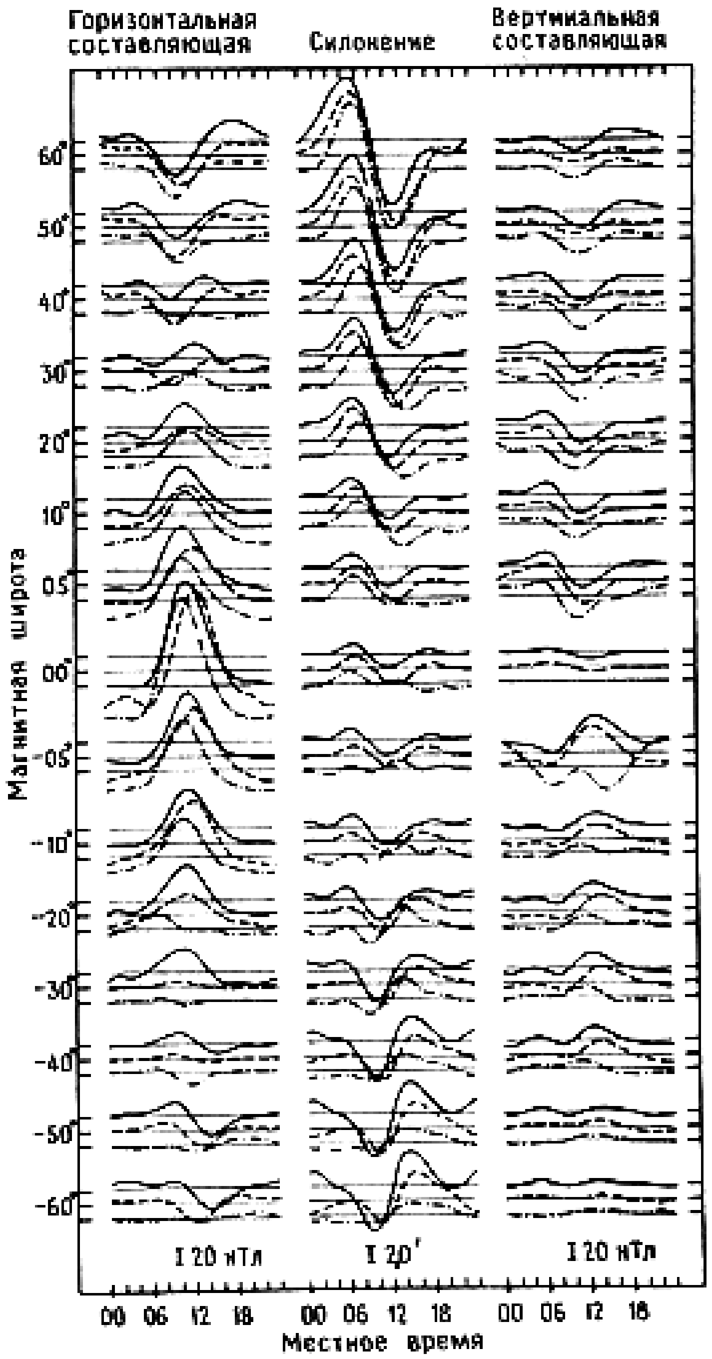


Рис. 3.32. Спокойные солнечно-суточные вариации S_q в месяцы J (см. рис. 3.33) для H, D и Z на разных магнитных широтах и в трех долготных зонах: Европе и Африке (сплошные кривые), Азии и Тихом океане (пунктирные кривые), Северной и Южной Америке (штрих-пунктирные кривые) (Matsushita, Maeda, 1965).

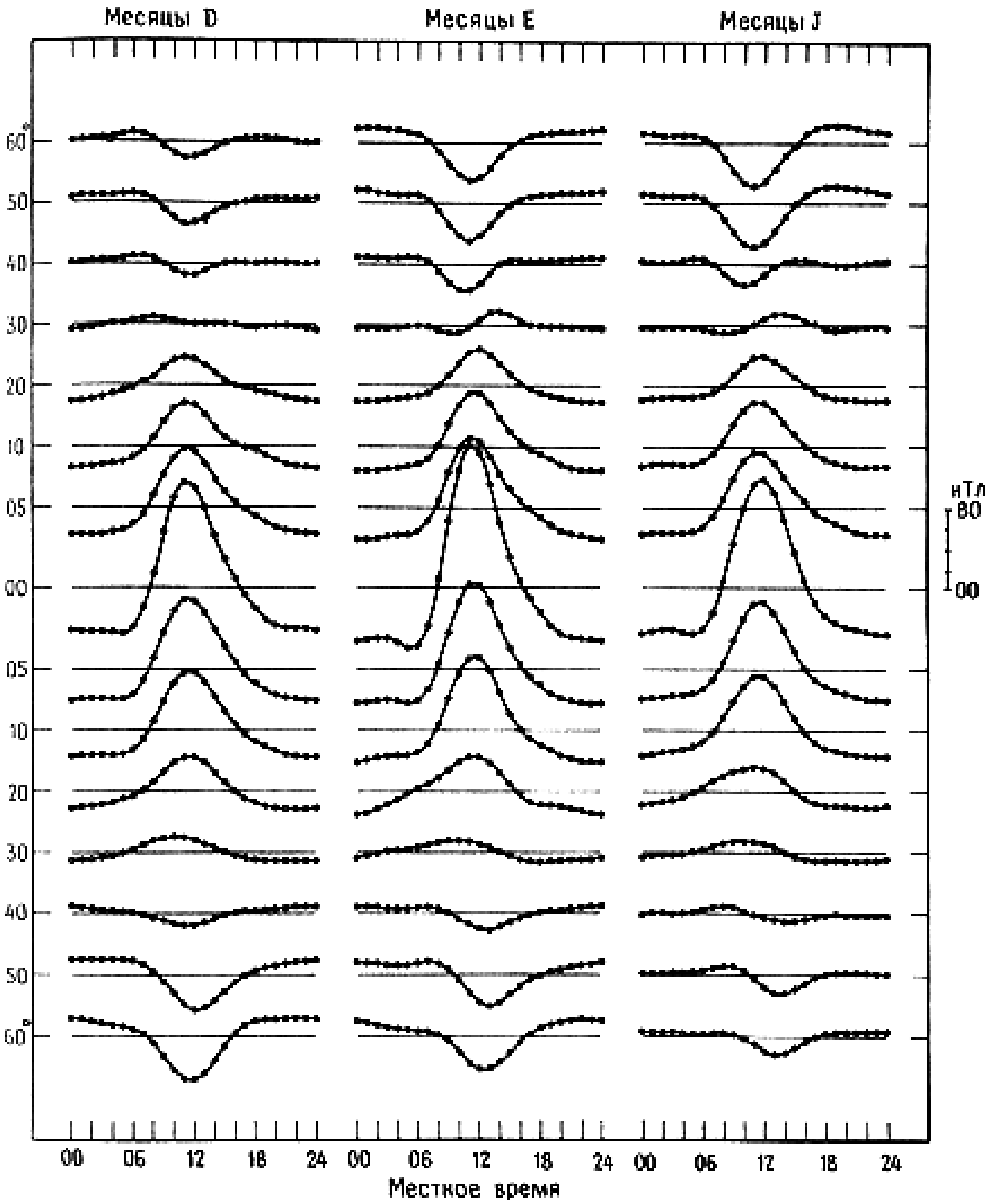


Рис. 3.33. Горизонтальная компонента вариации S_q для месяцев D (январь, февраль, ноябрь, декабрь), E (март, апрель, сентябрь, октябрь) и J (май, июнь, июль, август) (Matsushita, 1967).

а по наклонению –0,1°. Однако горизонтальная компонента S_q достигает около 200 нТл на магнитном экваторе. Следует отметить, что вариации S_q, показанные на рис. 3.32 и 3.33, обусловлены и ионосферными, и теллурическими токами (Matsushita, 1967).

Ионосферные приливы, вызванные гравитационным притяжением Луны, также воздействуют на *геомагнитную суточную вариацию*. Но в связи с тем, что амплитуды лунных гравитационных приливов обычно

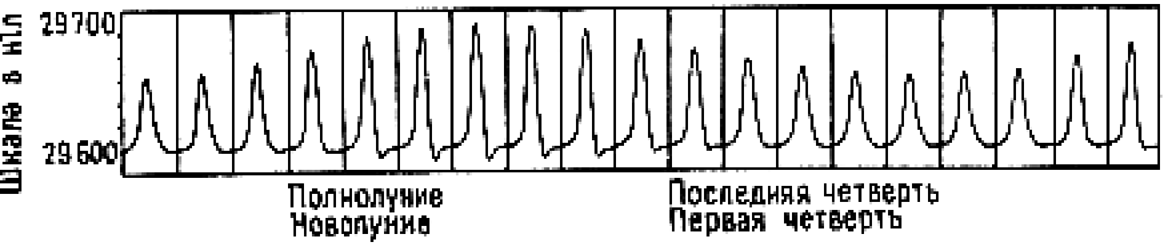


Рис. 3.34. Рассчитанная лунная модуляция спокойной солнечно-суточной вариации H в Гуанкайо, Перу (Chapman, Bartels, 1940).

составляют менее 1/10 от амплитуд солнечных тепловых приливов, лунные магнитные эффекты соответственно слабее. Главными лунными эффектами являются полумесячная модуляция величины S_q и лунная суточная вариация L. На рис. 3.34 показан экстремальный случай лунных эффектов, составленный по записям магнитной обсерватории Гуанкайо (Перу), которая расположена на высоте 3 350 м на магнитном экваторе. Вариация L прослеживается в виде небольших горбиков в минимуме вариаций S_q между полнолунием (новолунием) и последней четвертью (первой четвертью). L может превышать 10–20 нТл (на магнитном экваторе), но, как правило, в среднем составляет менее 5 нТл. Подобно океанским приливам, L имеет полусуточный период (Matsushita, 1967). Полумесячная модуляция S_q, показанная на рис. 3.34, составляет около 40 нТл.

Браун (Brown, 1972, 1976) предположил, что тонкие геофизические индикаторы или временные отметки, являясь по своей природе геоэлектромагнитными, важны и, возможно, критичны для маркировки биологических часов. Калмийн (Kalmijn, 1974) также предположил, что 24-часовая периодичность микропульсаций и геомагнитные суточные вариации могут служить индикаторами времени при синхронизации циркадианных ритмов, поскольку электрические поля, связанные с этими магнитными явлениями, часто находятся в пределах диапазона обнаружения их электрочувствительными рыбами. Линдауэр и Мартин (Lindauer, Martin, 1972) сообщали, что небольшая ошибка в направлении (или Missweisung) в виляющем танце пчел коррелировала с локальной геомагнитной суточной вариацией, и далее (Martin, Lindauer, 1977) они отмечали, что пчелы при отсутствии более важных индикаторов, таких как фотопериод, могли синхронизировать свои циркадианные ритмы с геомагнитной суточной вариацией.

Однако при отсутствии более убедительных доказательств вывод о том, что естественные геомагнитные вариации могут действовать как надежные датчики времени для биологических часов, должен рассматриваться скептически. Поля S_q, показанные на рис. 3.32 и 3.33, были получены в результате численной обработки большого количества мировых данных по магнитно-спокойным дням. Чепмен и Бартелс (Chapman, Bartels, 1940) отмечают, что рис. 3.34 не является реальной записью, а «очищен от нециклических и случайных изменений, которые присутствуют на реальных записях». В самом деле, в большинстве случаев чистые

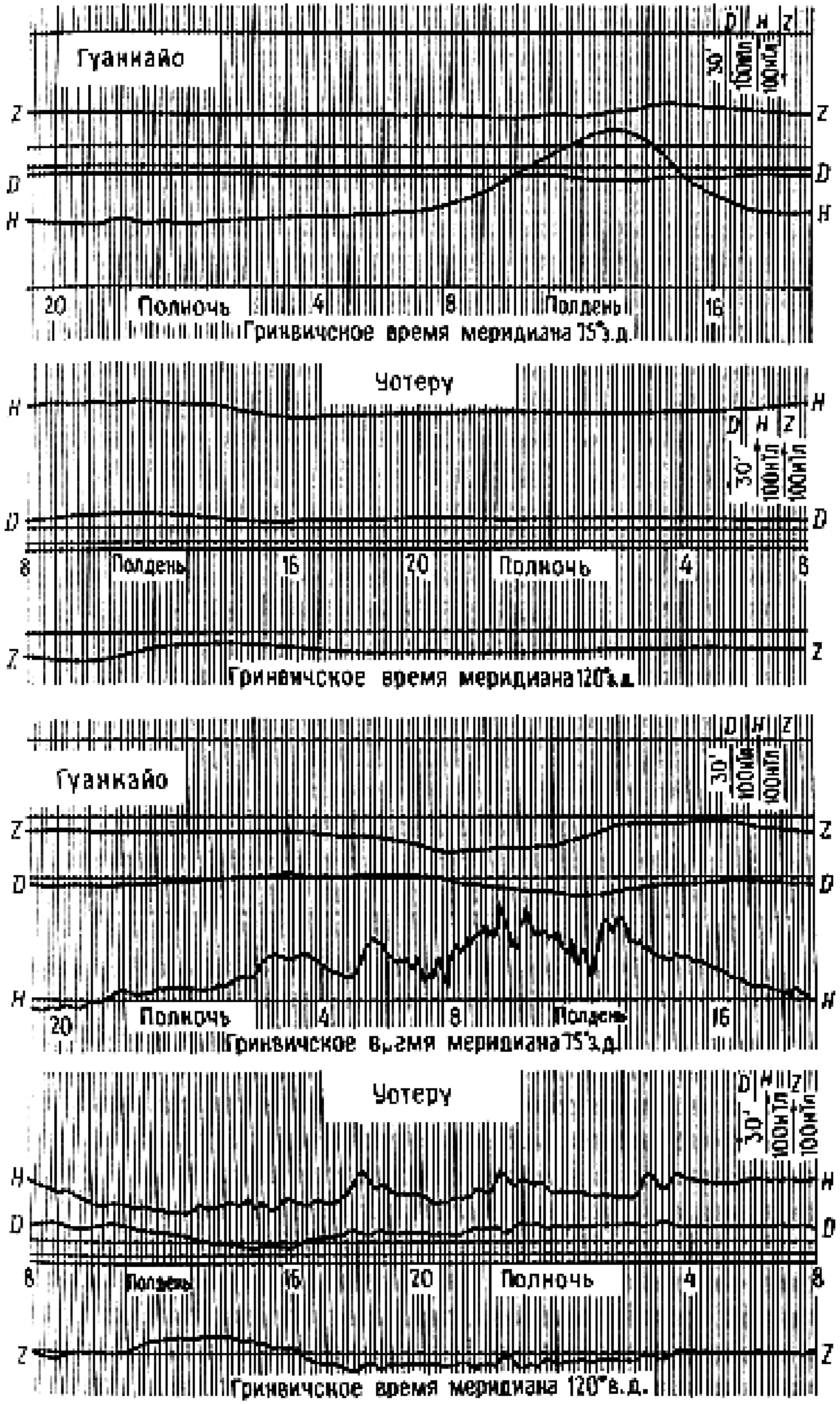


Рис. 3.35. Сравнение магнитограмм Гуанкайо (Перу) и Уотеру (Австралия) для магнитно-спокойных дней (верхние графики) и магнитно-возмущенных дней (нижние графики) (Chapman, Bartels, 1940).

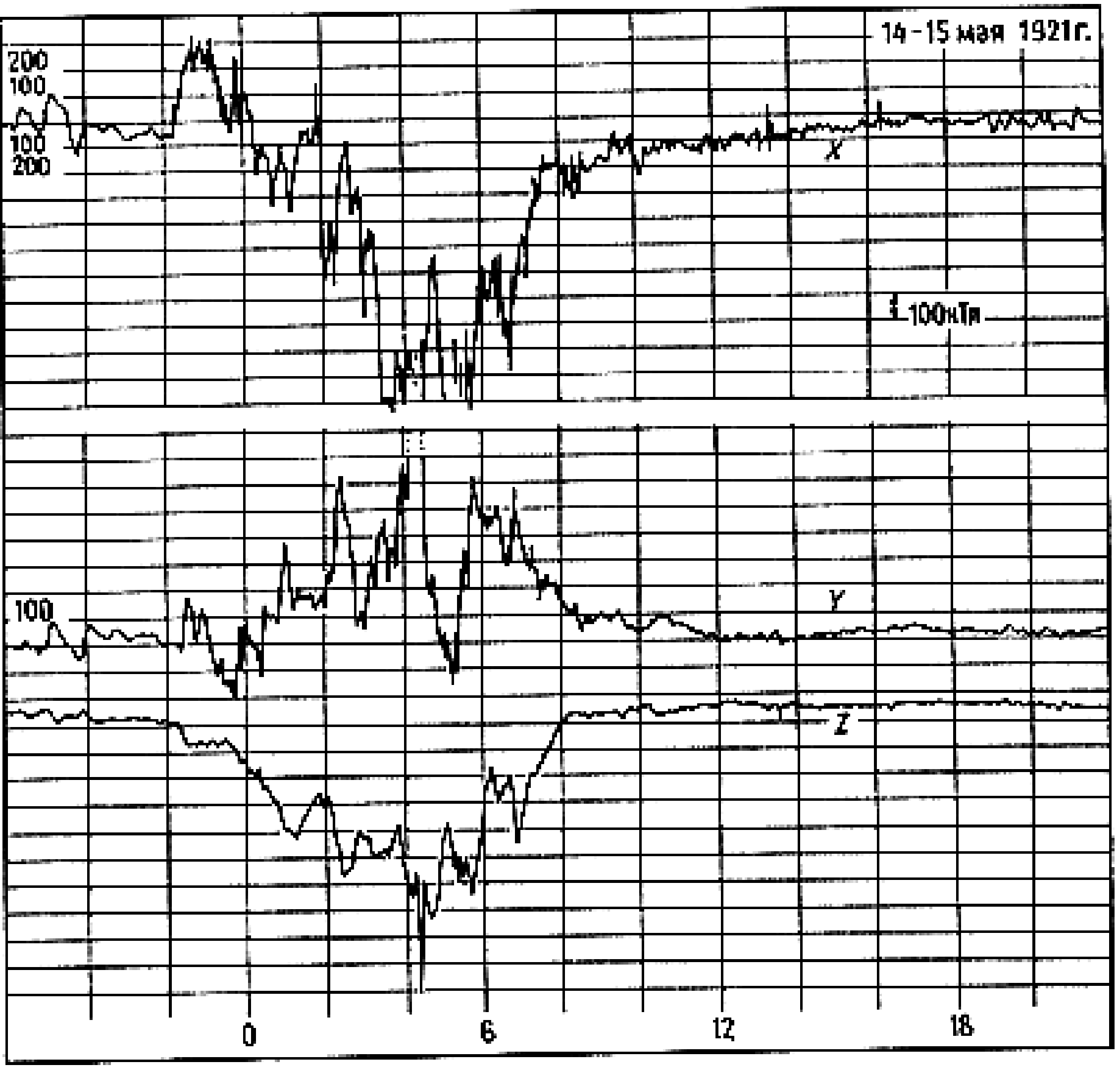


Рис. 3.36. Сильная магнитная буря, зарегистрированная в Потсдаме, Германия, в мае 1921 г. (Chapman, Bartels, 1940).

солнечные и лунные вариации либо сдвинуты по фазе, либо существенно искажены часто возникающими разнообразными магнитными возмущениями (рис. 3.35 и 3.36). Учитывая объем вычислений, который необходим для выделения лунной и S_q-вариаций из магнитных записей, полученных в обсерваториях, а также сообщения о том, что птицы (Keeton et al., 1974; Moore, 1977) и пчелы (Lindauer, Martin, 1972), по-видимому, не способны компенсировать небольшие магнитные возмущения, кажется сомнительным, чтобы организм мог использовать сигналы с таким большим шумом для поддержки своих биологических ритмов. Поскольку сигналы и шум, как правило, сравнимы между собой по амплитудам и временным шкалам, попытки привлечь к объяснению удивительную способность различных организмов выделять полезный сигнал не могут устранить указанное выше сомнение. Изменчивость день ото дня времени наступления максимума и минимума геомагнитных вариаций едва ли сравнима с точностью времени восхода и захода солнца, морских приливов или даже более изменчивых вариаций термопериода и ат-

мосферного давления. Однако еще совсем недавно существовал сходный скептицизм в отношении магниторецепции организмов вообще (например, Davis, 1948; Varian, 1948; Griffin, 1952).

3.3. Магнитные бури

Из различных возмущений магнитосферы наиболее сильными в смысле влияния на магнитное поле на земной поверхности являются *магнитные бури*. Как правило, наиболее интенсивная часть бури длится от 2 до 12 ч, в течение которых напряженность магнитного поля на земной поверхности меняется в пределах нескольких сотен нанотесл, а магнитное склонение – приблизительно в пределах градуса. Возмущения напряженности в десятки нанотесл могут существовать в течение суток. Магнитная буря – глобальное явление, но ее интенсивность изменяется в зависимости от района, возрастая в высоких широтах. На рис. 3.36 приведена полученная в Потсдаме (Германия) запись интенсивной магнитной бури, происшедшей 13–16 мая 1921 г. Наблюдались следующие изменения магнитных элементов: $\Delta D = 3°19'$, $\Delta H = 1060$ нТл, $\Delta Z = 1100$ нТл. Для еще более сильной бури 16 апреля 1938 г. в Потсдаме было записано: $\Delta D = 5°28'$, $\Delta H = 1900$ нТл, $\Delta Z = 600$ нТл (Chapman, Bartels, 1940). Однако такие сильные бури редки и случаются лишь раз в 10–20 лет. Что касается общей частоты возникновения магнитных бурь, то Чепмен и Бартелс (Chapman, Bartels, 1940) сообщали, что в течение 53 лет (с 1875 по 1927 г.) были зарегистрированы 343 магнитные бури, когда D менялось от 30′ до 60′, а H или Z – от 150 до 300 нТл, и еще 60 магнитных бурь, при которых D изменялось более чем на 60′, а H или Z – на 300 нТл. Таким образом, в среднем наблюдалось 7–8 бурь в год. Однако возникновение магнитных бурь коррелирует с 11-летним циклом солнечной активности и во время минимума активности падает. (У геомагнитных бурь часто обнаруживается 27-суточная повторяемость, по-видимому, обусловленная 27-суточным периодом вращения Солнца.)

Магнитная буря является прямым результатом солнечной вспышки. Последние возникают случайно, но их частота коррелирует с циклом солнечной активности. Во время максимума солнечной активности небольшие вспышки могут происходить ежечасно, а очень большие – ежемесячно. Из приведенных выше чисел очевидно, что не все солнечные вспышки вызывают заметные магнитные бури. Однако нижний предел 150 нТл, использованный при сравнении бурь, был произвольным; поэтому читатель не должен считать, что магнитные возмущения, напоминающие бури, с интенсивностью менее 150 нТл не могут иметь места. Случайно возникающие солнечные вспышки произвольной интенсивности соответственно возмущают магнитосферу в случайном режиме.

Общая феноменология магнитной бури хорошо иллюстрируется записью северной магнитной компоненты X на рис. 3.36. Когда происхо-

дит вспышка, облако протонов и электронов высокой энергии выбрасывается Солнцем и обычно достигает Земли через 30–50 ч. Когда облако сталкивается с магнитопаузой, магнитосфера внезапно сжимается и напряженность геомагнитного поля возрастает, извещая о начале магнитной бури. Резкое возрастание, называемое *внезапным началом* (SC), происходит в данном районе в течение нескольких минут и может достигать 100 нТл или более на поверхности Земли. SC распространяется через магнитосферу как магнитогидродинамическая волна, и, следовательно, время регистрации ее в различных районах может различаться. На рис. 3.36 SC возникло 14 мая вскоре после 22 ч 00 мин.

По мере того как облако солнечных частиц продолжает бомбардировать магнитопаузу, буря вступает в свою *начальную фазу*, во время которой напряженность поля остается высокой или может даже еще возрасти. В это время число захваченных геомагнитным полем частиц увеличивается, что приводит к возрастанию кольцевого тока и соответствующему уменьшению напряженности поля на земной поверхности. С этого уменьшения начинается *главная фаза* бури. В течение главной фазы напряженность поля может уменьшаться на несколько сотен нанотесл. Со временем, однако, избыток захваченных частиц уменьшается и поле медленно возвращается в свое нормальное состояние. Эта последняя стадия главной фазы известна как *фаза восстановления*. Во время смены полярности или в другие периоды пониженной напряженности геомагнитного поля (рис. 3.21), когда магнитопауза приближается к Земле, а авроральная зона расширяется до более низких широт (Siscoe et al., 1976), частота и сила магнитных бурь, регистрируемых на поверхности Земли, должна увеличиваться.

Морфология магнитной бури не всегда следует такой четко определенной картине (например, некоторые бури начинаются постепенно, а не внезапно), но общий результат тот же – геомагнитное поле испытывает значительные возмущения. Уолкотт (Walcott, 1978) наблюдал, что голуби, которые были выпущены вблизи магнитных аномалий, возмущающих локальное поле на 3000–5000 нТл, значительно хуже ориентировались относительно дома, чем голуби, выпущенные в тех районах, где аномалий не было. Аномалии такой величины только на порядок превышают те значения напряженности, которые наблюдаются во время умеренных магнитных бурь, и лишь немногим больше тех, которые наблюдаются при сильных магнитных бурях. Возмущения, наблюдаемые даже при умеренных магнитных бурях, существенно превышают «нормальные» геомагнитные возмущения, которые, как сообщалось, влияют на ориентацию птиц (Keeton et al., 1974; Moore, 1977). Существуют дополнительные, хотя и не подтвержденные данные о корреляции биологических явлений с геомагнитной активностью (Чернышов, 1968), ряд которых свидетельствует о влиянии геомагнитной активности на человека (Düll, Düll, 1935; Friedman et al., 1963, 1965). Однако воздействие геомагнитной активности на человека было подвергнуто сомнению Покорни и Меффердом (Pokorny, Mefferd, 1966).

3.4. Геомагнитные индексы

Чтобы описывать характер геомагнитной активности на протяжении суток, месяца, года или еще более длительных периодов времени и облегчить сравнение данных по магнитной активности с другой геофизической или солнечной информацией, ввели несколько цифровых индексов геомагнитной активности. Поскольку сообщалось (Moore, 1977) о корреляции между ориентацией птиц и некоторыми геомагнитными индексами, представляется важным понять, каким образом выводятся такие индексы и какой в них вложен физический смысл. Геомагнитные индексы ясно и кратко были рассмотрены в обзоре Линкольн (Lincoln, 1967). Намного более детальный и глубокий (но, возможно, не столь полезный для неспециалистов) анализ представлен в работе Mayaud, 1980. Ниже мы ограничимся *K*-индексом, поскольку именно для этого индекса были опубликованы данные о наличии биологической корреляции (Southern, 1971; Keeton et al., 1974; Moore, 1977). Из описания будет ясно, что к любым выводам относительно биологических воздействий геомагнитной активности, основанным на *K*-индексе, нужно подходить с осторожностью.

Геомагнитный *K*-индекс (от немецкого kennziffers – характеристика) представляет собой индекс трехчасового интервала. Он был введен в качестве характеристики потока солнечных частиц, вызывающих изменения в токах, влияние которых отражается на геомагнитной активности (Lincoln, 1967). Следовательно, эффекты солнечной S_q и лунной L суточных вариаций, так же как и эффекты, связанные с влиянием электромагнитного излучения солнечных вспышек на магнитосферу (называемые или sfe – *эффект солнечных вспышек*, – или *крюше*), должны быть исключены из наблюдаемых магнитных вариаций. Начиная с полуночи в течение суток для каждого трехчасового интервала определяется разность между максимальными и минимальными значениями каждого магнитного элемента *D*, *H*, *Z* или *X*, *Y*, *Z*, зарегистрированного в данной магнитной обсерватории. Часть каждой разности, которая связана с S_q, L или sfe (sfe может достигать 60 нТл и более), затем вычитается, чтобы получить интервал значений *a* для каждого элемента (рис. 3.37). Последний процесс весьма субъективен, поскольку от наблюдателя требуется оценить невозмущенную суточную вариацию, характерную для данной обсерватории, с учетом времени года и фазы Луны. С 1939 по 1963 г. наибольший из трех интервалов брался как основа для *K*-индекса. Но в связи с чувствительностью величины *Z* к индукционным эффектам в Земле с 1 января 1964 г. вариация компоненты *Z* исключена из определения *K*-индекса.

Используя постоянную шкалу перехода для данной обсерватории, для каждого трехчасового интервала определяется значение *K* в виде целых чисел от 0 до 9, соответствующее наибольшему значению *a*. Для стандартной среднеширотной обсерватории в Нимеке, Германия (52°04′

с. ш., 12°40′ в. д.), эта шкала имеет вид

K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нижний предел a, нТл	0	5	10	20	40	70	120	200	330	500

Таким образом, если $a < 5$ нТл, то $K = 0$. При $120 \leqslant a < 200$ нТл $K = 6$ и т. д. Поскольку амплитуда колебаний геомагнитной активности зависит от широты и в меньшей степени от долготы, шкалы K-индекса для различных обсерваторий выбираются соответственно. При этом интервал значений a умножают для каждого K на постоянную таким образом, чтобы распределение частот встречаемости значений K было, насколько это возможно, наиболее сходным для всех обсерваторий. На рис. 3.38 приведен нижний предел при $K = 9$ как функция широты для многих обсерваторий.

Отметим несколько важных свойств K-индекса.

1) Его определение включает в себя субъективный фактор (исключение S_q, L и *sfe*), что может оказаться существенным для низких значений K-индекса.

2) K-индекс является характеристикой геомагнитной вариации только в течение трехчасового интервала и за исключением очень больших значений K. Часто он неадекватно отражает возмущение поля относительно его нормальной величины. Например, для минимальной величины H на рис. 3.37 (пятый квадрат) определение K-индекса основывается на трехчасовой вариации порядка 80 нТл и не отражает тот факт,

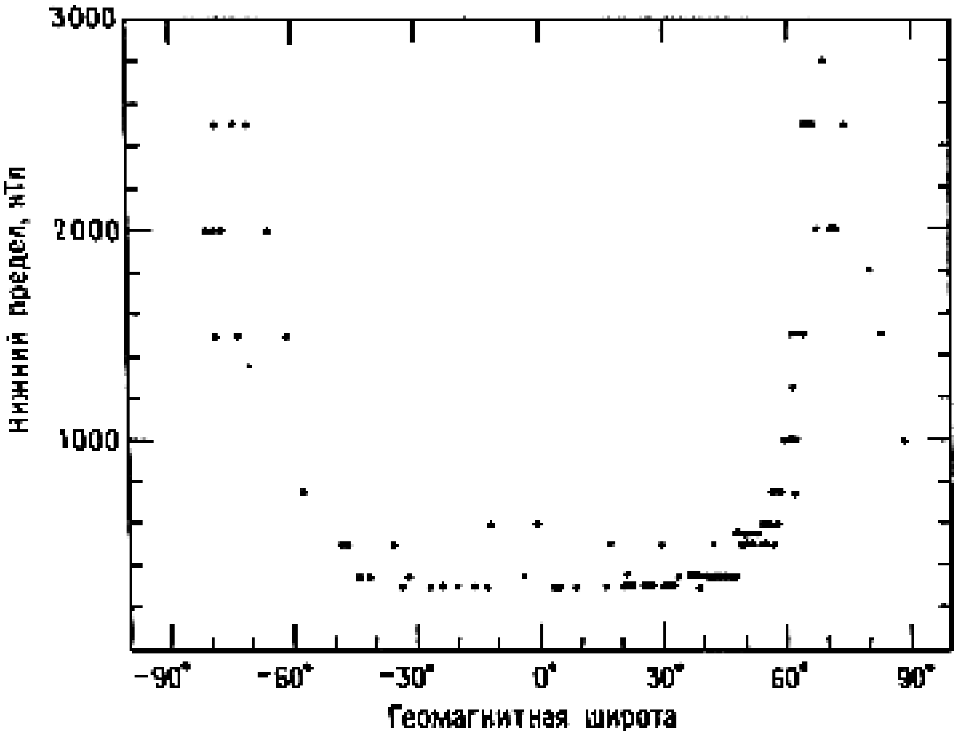


Рис. 3.38. Вариация нижнего предела напряженности при K-9 для нескольких геомагнитных обсерваторий, расположенных на разных геомагнитных широтах (Chernosky et al., 1965).

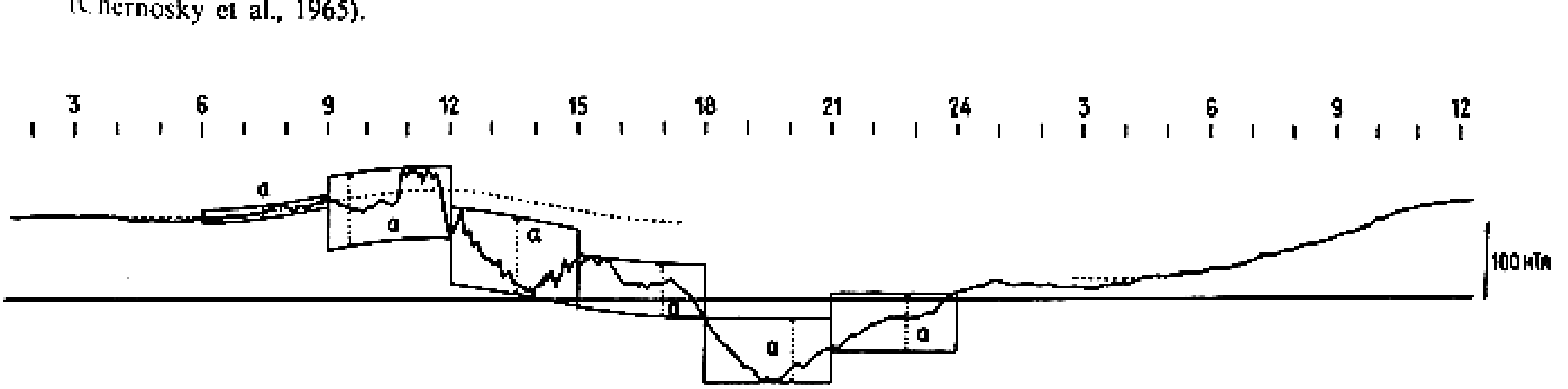


Рис. 3.37. Методика, используемая для определения K-индекса по каждому трехчасовому интервалу типичной магнитной записи. Пунктирной линией показана невозмущенная геомагнитная суточная вариация, обусловленная S_q и L; a - амплитуда вариации для данного трехчасового интервала после исключения S_q и L (Mayaud, 1980).

что H отличается от своего возмущенного значения примерно на 200 нТл (пунктирная линия).

3) Исключение из рассмотрения компоненты Z приводит к тому, что при определении K-индекса может произойти значительная недооценка реальной максимальной величины магнитной вариации.

4) Данное значение K-индекса строго соответствует только тому району, где оно было получено. Используя значения K-индекса, полученные в обсерватории, расположенной в 100 милях или более от точки проведения эксперимента, можно столкнуться с очень реальной возможностью, что локальные аномалии удельной проводимости в твердой Земле (которые отличаются от магнитных аномалий) или другие эффекты приводят к тому, что определения K-индекса в этой обсерватории непригодны. Имеющиеся трудности аналогичны тем, которые встречаются при использовании карты МЭГП для определения элементов локального магнитного поля. Биомагнитолог должен обладать достаточным опытом, чтобы провести небольшой объем магнитных наблюдений в точке эксперимента для сравнения с записями, сделанными в обсерватории.

5) Поскольку K-индекс выводился главным образом как мера потока солнечных частиц, а не геомагнитной активности, выводы относительно биологических воздействий геомагнитной активности, основанные на величине K-индекса, чреваты бóльшими ошибками, чем те, которые возникают при выводах причинно-следственных связей из статистической корреляции. Некоторые другие корреляции с солнечной активностью, например такие, как ее малоизученная связь с тонкими погодными явлениями (см., например, Wilcox et al., 1974), вполне могут быть ответственны за биологический эффект.

Литература

Barnothy M. F. (ed.), 1969. Biological Effects of Magnetic Fields, Vol. 2, Plenum Press, New York.

Barnwell F. H., Brown F. A., Jr., (1961). Magnetic and photic responses in snails, Experientia, **4**, 513.

Bergh H. W., 1970. Paleomagnetism of the Stillwater Complex, Montana. In: Paleogeophysics (S. K. Runcorn, ed.), Academic Press, New York, pp. 143–158.

Black D. I. (1967). Cosmic ray effects and faunal extinctions at geomagnetic field reversals, Earth Planet. Sci. Lett., **3**, 225–236.

Blakemore R. P. (1975). Magnetotactic bacteria, Science, **190**, 377–379.

Bliss V. L., Heppner F. H. (1976). Circadian activity rhythm influenced by near zero magnetic field, Nature, **261**, 411–412.

Bonhommet N., Zähringer J. (1969). Paleomagnetism and potassium argon age determinations of the Laschamp geomagnetic polarity event, Earth Planet. Sci. Lett., **6**, 43–46.

Briden J. C., Irving E., 1964. Paleoclimatic spectra of sedimentary paleoclimatic indicators. In: Problems in Paleoclimatology (A. E. M. Nairn, ed.), Interscience, New York, pp. 199–250.

Brock A. (1971). An experimental study of paleosecular variation, Geophys. J. R. Astron. Soc., **24**, 303–317.

Brown F. A., Jr. (1962). Responses of the planarian Dugesia, and the protozoan, Paramecium, to very weak horizontal magnetic fields, Biol. Bull., **123**, 264–281.

Brown F. A., Jr. (1972). The "clocks" timing biological rhythms, Am. Sci., **60**, 756–766.

Brown F. A., Jr. (1976). Biological clocks: Endogenous cycles synchronized by subtle geophysical rhythms, Biosystems, **8**, 67–81.

Bullard E. C. (1949). The magnetic field within the earth, Proc. R. Soc. London. Ser. A, **197**, 433–353.

Busse F. H. (1978). Magnetohydrodynamics of the earth's dynamo, Annu. Rev. Fluid Mech., **10**, 435–462.

Busse F. H., 1980. Motions in the earth's core and the origin of geomagnetism. In: Physics of the Earth's Interior, LXXVIII Corso, Soc. Italiana di Fisica, Bologna, Italy, pp. 493–507.

Busse F. H. (1983). Recent developments in the dynamo theory of planetary magnetism, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., **11**, 241–268.

Butler R. F., Opdyke N. D. (1979). Magnetic polarity stratigraphy, Rev. Geophys. Space phys., **17**, 235–244.

Cain J. C., Hendricks S. J., 1968. The Geomagnetic Secular Variation, NASA Tech. Note D-4527.

Campbell W. H., 1967. Geomagnetic pulsations. In: Physics of Geomagnetic Phenomena, Vol. 2 (S. Matsushita and W. H. Campbell, eds.), Academic Press, New York, pp. 821–909.

Carmichael C. M. (1967). An outline of the intensity of the paleomagnetic field of the earth, Earth Planet. Sci. Lett., **3**, 351–354.

Carmichael C. M. (ed.), 1977, Paleomagnetic Field Intensity: Its Measurement in Theory and Practice, Phys. Earth Planet. Inter., 13.

Chan L. S., Alvarez W. (1983). Magnetic polarity stratigraphy, Rev. Geophys. Space Phys., **21**, 620–626.

Chapman S., Bartels J., 1940. Geomagnetism, Vol. 1 and 2, Oxford University Press (Clarendon), London.

Chernosky E. J., Fougere P. F., Hutchinson R. O., 1965. The geomagnetic field. In: USAF Handbook of Geophysics and Space Environments (S. L. Valley, ed.), Air Force Cambridge Research Laboratories, Office of Aerospace Research, USAF, pp. 11-1–11-61.

Cox (1968). Lengths of geomagnetic polarity intervals, J. Geophys. Res., **73**, 3247–3260.

Cox A. (1969). Geomagnetic reversals, Science, **163**, 237–245.

Cox A. (1975). The frequency of geomagnetic reversals and the symmetry of the nondipole field, Rev. Geophys. Space Phys., **13**, 35–51.

Cox A., 1983. Magnetostratigraphic time scale. In: A Geologic Time Scale (W. B. Harland, A. V. Cox, P. G. Llewellin, A. G. Smith, and R. Walters, eds.), Cambridge University Press, London.

Cox A., Doell R. R., Dalrymple G. S. (1964). Reversals of the earth's magnetic field, Science, **144**, 1537–1543.

Davis L. (1948). Remarks on: "The physical basis of bird navigation", J. Appl. Phys., 19, 157–160.

Denham C. R., Cox A. (1971). Evidence that the Laschamp polarity event did not occur 13,300–30,400 years ago, Earth Planet. Sci. Lett., **13**, 181–190.

Dodson R., Dunn J. R., Fuller M., Williams I., Ito H., Schmidt V. A., Wu Y.-M. (1978). Paleomagnetic record of a late Tertiary field reversal, Geophys. J. R. Astron. Soc., 53, 373–412.

Doell R. R., Cox A. (1961). Paleomagnetism, Adv. Geophys., **8**, 221–313.

Düll T., Düll B. (1935). Zusammenhange zwischen Storungen des Erdmagnetismus and Haufungen von Todesfallen, Dtsch. Med. Wochenschr., **61**, 95.

Durrani S. A., Kahn H. A. (1971). Ivory Coast microtektites, fission track age and geomagnetic reversals, Nature, **232**, 320–323.

Elsasser W.M. (1946). Induction effects in terrestrial magnetism, Part I, Theory, Phys. Rev., **69**, 106–116.

Elsasser W.M., 1963. Early history of the earth. In: Earth Sciences and Meteoritics (J. Geiss and E.D. Goldbert, eds.), North-Holland, Amsterdam, pp. 1–30.

Force E.R. (1984). A relation among geomagnetic reversals, seafloor spreading rate, paleoclimate, and black shales, ES, Trans. Am. Geophys. Union, **65**, 18–19.

Frankel R.B., Blakemore R.P., Wolfe R.S. (1979). Magnetite in freshwater magnetotactic bacteria, Science, **203**, 1355–1356.

Frankel R.B., Blakemore R.P., Torres de Araujo F.F., Esquivel D.M.S., Danon J. (1981). Magnetotactic bacteria at the geomagnetic equator, Science, **212**, 1269–1270.

Friedman H. (1983). The legacy of the IGY, Eos. Trans. Am. Geophys. Union, **32**, 497–499.

Friedman H., Becker R.E., Bachman C.H. (1963). Geomagnetic parameters and psychiatric hospital admissions, Nature, **200**, 626–628.

Friedman H., Becker R.E., Bachman C.H. (1965). Psychiatric ward behavior and geophysical parameters, Nature, **213**, 949–956.

Fuller M., Williams I., Hoffman K. (1979). Paleomagnetic records of geomagnetic field reversals and the morphology of the transitional fields, Rev. Geophys. Space Phys., **17**, 179–205.

Gaibar-Puertas C., 1953. Varacion secular del campo geomagnetico, Tortosa, Spain, Observ. del Ebro Memo, No. 11.

Gilbert Wm. of Colchester, 1600. De Magnete, magneticisque Corporibus, et de magno Magnete Tellure; Physiologia nova, plurimus and argumentis and experimentis demonstrata, Peter Short, London.

Glass B., Heezen B.C. (1967). Tektites and geomagnetic reversals, Nature, **214**, 372.

Gould J.L., Kirschvink J.L., Deffeyes K.S. (1978). Bees have magnetic remanence, Science, **201**, 1026–1028.

Griffin D.R. (1952). Bird navigation, Biol. Rev., **27**, 359–400.

Hahn A.G., 1971. Types of magnetic anomalies measured on land and general aspects of their geological meaning. In: World Survey 1957–1969 (A.J. Zmuda, ed.), International Association of Geomagnetism and Aeronomy, pp. 134–143.

Harrison G.C.A. (1968). Evolutionary processes and reversals of the earth's magnetic field, Nature, **217**, 46–47.

Harrison G.C.A., Funnell B.M. (1964). Relationship of paleomagnetic reversals and micropaleontology in two late Cenozoic cores from the Pacific Ocean, Nature, **204**, 566.

Harrison G.C.A., Somayajulu B.L.K. (1966). Behavior of the earth's magnetic field during a reversal, Nature, **212**, 1193–1195.

Hays J.D. (1971). Faunal extinctions and reversals of the earth's magnetic field, Geol. Soc. Am. Bull., **82**, 2433–2447.

Hays J.D., Opdyke N.D. (1967). Antarctic Radiolaria, magnetic reversals and climatic change, Science, **158**, 1001–1011.

Hays J.D., Saito T., Opdyke N.D., Burckle L. (1969). Pliocene/Pleistocene sediments of the equatorial Pacific: Their paleomagnetic, biostratigraphic, and climatic record, Geol. Soc. Am. Bull., **80**, 1481–1514.

Heirtzler J.R., Dickson G.O., Herron E.M., Pitman W.C., III, LePichon X. (1968). Marine magnetic anomalies, geomagnetic field reversals and and motion of the ocean floor and continents, J. Geophys. Res., **73**, 2119–2136.

Herzenberg A. (1958). Geomagnetic dynamos, Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A, **250**, 543–585.

Hillhouse J., Cox A. (1976). Brunhes–Matuyama polarity transition, Earth Planet. Sci. Lett., **29**, 51–64.

Hoffman K.A., Fuller M. (1978). Transitional field configuration and geomagnetic reversal, Nature, **273**, 715–718.

Irving E., Pullaiah G. (1976). Reversals of the geomagnetic field, magnetostratigraphy, and relative magnitide of paleosecular variation in the Phanerozoic, Earth-Sci. Rev., **12**, 35–64.

Jacobs J.A., 1963. The Earth's Core and Geomagnetism, Pergamon Press, Elmsford N.Y.

Jacobs J.A. (1981). Heat flow and reversals of the earth's magnetic field, J. Geomagn. Geoelectr., **33**, 527–529.

Kalmijn A.J., 1974. The detection of electric fields from inanimate and animate sources other than electric organs. In: Handbook of Sensory Physiology, Vol. III/3 (A. Fessard, ed.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 147–200.

Kalmijn A.J., 1978. Experimental evidence of geomagnetic orientation in elasmobranch fishes. In: Animal Migration, Navigation, and Homing (K. Schmidt-Koenig and W.T. Keeton, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 345–353.

Kalmijn A.J. (1982). Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes, Science, **218**, 916–918.

Keeton W.T. (1971). Magnets interfere with pigeon homing, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **68**, 102–106.

Keeton W.T. (1974). The orientational and navigational basis of homing in birds, Adv. Study Behav., **5**, 47–132.

Keeton W.T., Larkin T.S., Windsor D.M. (1974). Normal fluctuations in the earth's magnetic field influence pigeon orientation, J. Comp. Physiol., **95**, 95–103.

Kennett J.P., Watkins N.D. (1970). Geomagnetic polarity change, volcanic maxima and faunal extinction in the South Pacific, Nature, **227**, 930–934.

King J.W. (1974). Weather and the earth's magnetic field, Nature, **247**, 131–134.

Kirschvink J.L., Lowenstam H.A. (1979). Mineralization and magnetization of chiton teeth: Paleomagnetic, sedimentologic, and biologic implications of organic magnetite, Earth Planet. Sci. Lett., **44**, 193–204.

Kuterbach D.A., Walcott B., Reeder R.J., Frankel R.B. (1982). Iron-containing cells in the honey bee (*Apis mellifera*), Science, **218**, 695–697.

La Brecque J.L., Kent D.V., Cande S.C. (1977). Revised magnetic polarity time scale for late Cretaceous and Cenozoic time, Geology, **5**, 330–335.

Larson R.L., Hilde T.W.C. (1975). A revised time scale of magnetic reversals for the early Cretaceous and late Jurassic, J. Geophys. Res., **80**, 2586–2594.

Lincoln J.V., 1967. Geomagnetic indices. In: Physics of Geomagnetic Phenomena, Vol. I (S. Matsushita and W.H. Campbell, eds.), Academic Press, New York, pp. 67–100.

Lindauer M., Martin H., 1972. Magnetic effect on dancing bees. In: Animal Orientation and Navigation (S.R. Galler, K. Schmidt-Koenig, G.J. Jacob, and R.E. Belleville, eds.), NASA SP-262, U.S. Government Printing office, Washington, D.C.

Lowes F.J., Wilkinson I. (1963). Geomagnetic dynamo: A laboratory model, Nature, **198**, 1158–1160.

McDonald K.L., Gunst R.H., 1967. An analysis of the earth's magnetic field from 1835 to 1965, ESSA Tech. Rep. IER 46-IES 1, U.S. Department of Commerce, Boulder, Colo.

McDougall I., 1979. The present status of the geomagnetic polarity time scale. In: The Earth: Its Origin, Structure, and Evolution (M.W. McElhinny, ed.), Academic Press, New York.

McElhinny M.W. (1969). The paleomagnetism of the Permian of southeast Australia and its significance regarding the problem of intercontinental correlation, Spec. Publ. Geol. Soc. Aust., **2**, 61–67.

McElhinny M.W. (1971). Geomagnetic reversals during the Phanerozoic, Science, 172, 157–159.

McElhinny M.W., 1973. Paleomagnetism and Plate Tectonics, Cambridge University Press, London.

McElhinny M.W., 1979. Paleogeomagnetism and the core–mantle interface. In: The Earth: Its Origin, Structure, and Evolution (M.W. McElhinny, ed.), Academic Press, New York.

McElhinny M.W., Evans M.E. (1968). An investigation of the strength of the geomagnetic field in the early Precambrian, Phys. Earth Planet. Inter., **1**, 485–497.

McElhinny M. W., Merrill R. T. (1975). Geomagnetic secular variation over the past 5 m. y., Rev. Geophys. Space Phys., **13**, 687–708.

McElhinny M. W., Senanayke W. E. (1980). Paleomagnetic evidence for the existence of the geomagnetic field 3.5 GA ago, J. Geophys. Res., **85**, 3523–3528.

McPherron R. L. (1979). Magnetospheric substorms, Rev. Geophys. Space Phys., **17**, 657–681.

Malkus W. V. R. (1968). Precession of the earth as the cause of geomagnetism, Science, **160**, 259–264.

Mankinen E. A., Dalrymple G. B. (1979). Revised geomagnetic polarity time scale for the interval 0–5 m. y. B. P., J. Geophys. Res., **84**, 615–626.

Martin H., Lindauer M. (1977). Der Einfluss der Erdmagnetfelds and die Schwereorientierung der Honigbiene, J. Comp. Physiol., **122**, 145–187.

Mathews J. H., Gardner W. K., 1963. Field reversals of paleomagnetic type in coupled disk dynamos, U. S. Naval Res. Lab. Rep. 5886.

Matsushita S., 1967. Solar quiet and lunar dialy variation fields. In: Physics of Geomagnetic phenomena (S. Matsushita and W. H. Campbell, eds.), Vol. I, Academic Press, New York, pp. 301–424.

Matsushita S., Campbell W. H. (eds.), 1967. Physics of Geomagnetic Phenomena, Vol. 1 and 2, Academic Press, New York.

Matsushita S., Maeda H. (1965). On the geomagnetic solar quiet daily variation field during the IGY, J. Geophys. Res., **70**, 2535–2558.

Mayaud P. N., 1980. Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices, Geophysical Monograph. 22, American Geophysical Union, Washington, D. C.

Merrill R. T., McElhinny M. W., 1983. The Earth's Magnetic Field: Its History, Origin, and Planetary Perspective, Academic Press, New York.

Merrill R. T., McElhinny M. W., Stevenson D. J. (1979). Evidence for long-term asymmetries in the earth's magnetic field and possible implications for dynamo theories, Phys. Earth Planet. Inter., **20**, 75–82.

Moore F. R. (1977). Geomagnetic disturbance and the orientation of nocturnally migrating birds, Science, **196**, 682–684.

Needham J., 1962. Science and Civilization in China, Vol. 4, Cambridge University Press, London.

Newell N. D. (1963). Crises in the history of life, Sci. Am., **208**, 76–92.

Opdyke N. D., Henry K. W. (1969). A test of the dipole hypothesis, Earth Planet. Sci. Lett., **6**, 139–151.

Opdyke N. D., Glass G., Hays J. D., Foster J. (1966). Paleomagnetic study of Antarctic deep-sea cores, Science, **154**, 349–357.

Opdyke N. D., Kent D. V., Lowrie W. (1973). Details of magnetic polarity transitions recorded in a high deposition rate deep-sea core, Earth Planet. Sci. Lett, **20**, 315–324.

Palmer J. D. (1963). Organismic spatial orientation in very weak magnetic fields, Nature, **198**, 1061–1062.

Phillips J. B. (1977). Use of the earth's magnetic field by orienting cave salamanders (*Eurycea lucifuga*), J. Comp. Physiol. A, **273**, 273–288.

Pitman W. C., III, *Hayes D. E.* (1968). Sea-floor spreading in the Gulf of Alaska, J. Geophys. Res., **73**, 6571–6580.

Pokorny A. D., Mefferd R. B., Jr. (1966). Geomagnetic fluctuations and disturbed behavior, J. Nerv. Ment. Dis., **143**, 140–151.

Prevot M. (1977). Large intensity changes of the nondipole field during a polarity transition, Phys. Earth Planet. Inter., **13**, 342–345.

Price A. T., 1967. Electromagnetic induction within the earth. In: Physics of Geomagnetic Phenomena, Vol. I (S. Matsushita and W. H. Campbell, eds.), Academic Press, New York, pp. 235–298.

Quinn T. P., Merrill R. T., Brannon E. L. (1981). Magnetic field detection in sockeye salmon, J. Exp. Zool., **217**, 137–142.

Ratcliffe J. A., 1972. An Introduction to the Ionosphere and Magnetosphere, Cambridge University Press, London.

Reid G. C., Isaksen I. S. A., Holzer T. E., Crutzen P. J. (1976). Influence on ancient solar-proton events on the evolution of life, Nature, **259**, 177–179.

Rikitake T. (1958). Oscillations of a system of disk dynamos, Proc. Cambridge Philos. Soc., **54**, 89–105.

Rikitake T. (1964). Outline of the anomaly of geomagnetic variations in Japan, J. Geomagn. Geoelectr., **15**, 181–184.

Ringwood A. E., 1979. Composition and origin of the earth. In: The Earth: Its Origin, Structure, and Evolution (M. W. McElhinny, ed.), Academic Press, New York, pp. 1–58.

Roederer J. G. (1974). The earth's magnetosphere, Science, **183**, 37–46.

Sagan C. (1965). Is the early evolution of life related to the development of the earth's core? Nature, **206**, **448**.

Schopf J. W., Oehler D. Z. (1976). How old are the eukaryotes? Science, **193**, 47–49.

Shaw J. (1977). Further evidence for a strong intermediate state of the paleomagnetic field, Geophys. J. R. Astron. Soc. **48**, 263–269.

Simpson J. F. (1966). Evolutionary pulsations and geomagnetic polarity, Geol. Soc. Am. Bull., **77**, 197–204.

Siscoe G. L., Chen C.-K., Harel M. (1976). On the altitude of the magnetopause during geomagnetic reversals, J. Atmos. Terr. Phys., **38**, 1327–1331.

Skiles D. D. (1970). A method of inferring the direction of drift of the geomagnetic field from paleomagnetic data, J. Geomagn. Geoelectr., **22**, 441–462.

Smith P. J. (1967). Intensity of the earth's magnetic field in the geological past, Nature, **216**, 989–990.

Southern W. E. (1971). Gull orientation by magnetic cues: A hypothesis revisted, Ann. N. Y. Acad. Sci., **188**, 295–311.

Stevenson D. J. (1981). Models of the earth's core, Science, **214**, 611–619.

Strangway D. W., 1970. History of the Earth's Magnetic Field, McGraw-Hill, New York.

Thellier E., Thellier O. (1959). Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, Ann. Geophys., **15**, 285–376.

Чернышев В. Б. (1968). Возмущения магнитного поля Земли и биологический ритм у бабочки, *Trogoderma*, Журнал общ. биол., **29**, 719–722.

Uffen R. J. (1963). Influence of the earth's core on the origin and evolution of life, Nature, **198**, 143–144.

Van Allen J. A. (1959). The geomagnetically trapped corpuscular radiation, J. Geophys. Res., **64**, 1683–1689.

Varian R. H. (1948). Remarks on: "A preliminary study of a physical basis of bird navigation", J. Appl. Phys., **19**, 306–307.

Verhoogen J. (1961). Heat balance of the earth's core, Geophys. J. R. Astron. Soc., **4**, 276–281.

Vogt P. R. (1975). Changes in geomagnetic reversal frequency at times of tectonic changes: Evidence for coupling between core and upper mantle processes, Earth Planet. Sci. Lett., **25**, 313–321.

Waddington C. J. (1967). Paleomagnetic field reversals and cosmis radiation, Science, **158**, 913–915.

Walcott C. 1978. Anomalies in the earth's magnetic field increase the the scatter of pigeon vanishing bearings. In: Animal Migration, Navigation, and Homming (K. Schmidt-Koenig and W. T. Keeton, eds.), Sprinder-Verlag, Berlin, pp. 143–151.

Walcott C., Green R. P. (1974). Orientation of homing pigeons altered by a chage in the direction of the applied magnetic field, Science, **184**, 180–182.

Walcott C., Gould J. L., Kirschvink J. L. (1979). Pigeons have magnets, Science, **205**, 1027–1029.

Watkins N. D., Goodell H. G. (1967). Geomagnetic polarity change and faunal extinction in the southern ocean, Science, **156**, 1083–1089.

Wikswo J. P., Jr., Barach J. P., Freeman J. A. (1980). Magnetic field of a nerve impulse: First measurements, Science, **208**, 53–55.

Wilcox J. M., Scherrer P. H., Svalgoard L., Roberts W. O., Olsen R. H., Jenne R. L.

(1974). Influence of solar magnetic sector structure on terrestrial atmospheric vorticity, J. Atmos. Sci., 31, 581–588.
Wollin G., Kukla G. J., Ericson D. B., Ryan W. B. F., Wollin J. (1973). Magnetic intencity and climatic changes 1925–1970, Nature, 242, 34–37.
Zmuda A. J. (ed.), 1971. World Magnetic Survey 1957–1969, International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Bulletin No. 28.
Zoeger J., Dunn J. R., Fuller M. (1981). Magnetic material in the head of the Pacific dolphin, Science, 213, 892–894.

Приборы и методы II

Большинство работ по исследованию биогенного магнетита за последние десять лет были выполнены с использованием стандартных лабораторных методов. Нужно было только модифицировать их с тем, чтобы можно было работать с нанограммовыми количествами ферромагнитных минералов, содержащимися в тканях живых организмов. Из-за высоких темпов развития техники эксперимента научная литература не успевает подробно освещать эту область, особенно когда дело касается сложных методик, соединяющих в себе несколько лабораторных технологий. В связи с этим возникает необходимость в ознакомлении всех, кто занимается биомагнетизмом, с результатами этих новейших разработок.

На примере трех статей, опубликованных в 1984 г., можно видеть, как могли бы измениться и техника эксперимента, и его интерпретация, если бы материалы этой части данной книги были в распоряжении авторов статей. В первой из них магнитный материал был экстрагирован из тканей головы небольшого позвоночного посредством кипячения. Во второй сообщается о сравнительно крупных многодоменных частицах вулканического магнетита, обнаруженного в sacculus (часть внутреннего уха) простейшего позвоночного, и высказывается предположение, что они использовались этим животным для магниторецепции. Третья группа исследователей, изучавшая препараты небольшого позвоночного, зафиксированные органической смолой, с помощью обычных палеомагнитных методов зарегистрировала большую остаточную намагниченность и пришла к выводу, что железо, обнаруженное при гистохимическом анализе препаратов, также может использоваться в процессе магниторецепции.

Рассмотрение химических и магнитных свойств магнетита и физических основ магниторецепции предполагает другие объяснения результатов всех этих экспериментов. Очень мелкие частицы магнетита легко окисляются до маггемита, гематита и других оксидов железа, особенно при повышенных температурах. Поэтому в упомянутом процессе экстракции магнетит вряд ли оставался в той же форме, какую он имел в организме животного. Крупные многодоменные частицы магнетита в природных образцах обладают малым магнитным моментом и могут намагничиваться только в достаточно сильных магнитных полях, так что участие в магниторецепции обладающих большой массой и малым моментом многодоменных частиц, поведение которых в вязкой среде в основном определяется гравитационными силами, представляется мало-

вероятным. Далее, многие материалы и инструменты, считающиеся немагнитными, такие как вода, хирургический инструмент из нержавеющей стали, тефлон и фиксирующие органические смолы, часто содержат весьма существенные количества ферромагнитных включений. Поэтому при использовании геомагнитных методов для изучения биогенного ферримагнетизма необходимы тщательные контрольные измерения. Такая же осторожность нужна и при поисках магнетита в препаратах тканей, изобилующих частицами железа, гистохимическими методами. Их успешному применению способствовал бы синтез специального красителя для выявления магнетита в препаратах, исследуемых под микроскопом.

Приведенные примеры иллюстрируют трудности независимого использования отдельных подходов для исследования биогенного ферримагнетизма и показывают необходимость детального обсуждения основных методов, которые могут применяться в данной области. В этой части книги рассмотрены принципы и применение сквид-магнитометрии, методов экстракции магнетита из тканей, электронной микроскопии биогенных минералов, а также устройство экранированных лабораторий. Впервые описания всех этих подходов собраны воедино. В четвертой части рассмотрены мессбауэровская спектроскопия и различные модификации электронной микроскопии. Мы надеемся, что все эти материалы, и в особенности те из них, которые представлены во второй части книги, будут интересны не только биомагнитологам, но и геофизикам.

Глава 4
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКВИД-МАГНИТОМЕТРОВ В БИОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

М. Фуллер, В. Гори, В. Гудман[1]

1. Введение

Создание магнитометров со сверхпроводящими квантовыми интерферометрическими датчиками (сквидами) существенно расширило возможности техники измерения магнитного поля. Чувствительность сквид-магнитометров на несколько порядков превосходит чувствительность магнитометрических приборов других типов. На основе этих датчиков были сконструированы магнитометры для измерения магнитных моментов небольших образцов, например стандартных цилиндров из породы при палеомагнитных исследованиях или биологических образцов с малым содержанием магнетита, представляющих интерес с точки зрения биомагнетизма. Измеряя магнитный момент образца без приложения внешнего магнитного поля, мы получаем остаточную намагниченность; при наличии же внешнего поля можно определить магнитную восприимчивость образца. С помощью сквид-градиентометров были сняты магнитные кардио- и энцефалограммы, причем для этого нужно было зарегистрировать индукцию поля порядка нескольких фемтотесла (микрогамм)!

Устройство и принципы работы сквидов изложены во многих работах (например, Jaklevic et al., 1965; Zimmerman et al., 1970; Mercereau, 1970; Nisenoff, 1970; Josephson, 1974; Clarke, 1974). Прекрасные описания сквид-магнитометров содержатся в сравнительно недавно опубликованных обзорах биомагнитных методик (например, Romani et al., 1982; Erne, 1983)[2].

Эта глава представляет собой практическое руководство по применению сквид-магнитометров. Разд. 2 начинается с введения, вклю-

---

[1] *M. Fuller*, Department of Geological Sciences, University of California, Santa Barbara, California 93106. *W. S. Goree, W. L. Goodman*, 2-G Enterprises, Mountain View, California 94043.

[2] В книгах Введенский В. Л., Ожогин В. И. Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм.- М.: Наука, 1986, и Холодов Ю. А., Козлов А. Н., Горбач А. М. Магнитные поля биологических объектов.- М.: Наука, 1987, можно найти материалы по многим вопросам, рассматриваемым в данной главе.- *Прим. перев.*

чающего историю развития сквид-магнитометрии и качественное описание работы сквидов. Далее следует более детальное обсуждение принципов сверхпроводниковой квантовой интерферометрии на основе уравнений Лондона и Джозефсона с приложением к таким практическим вопросам, как устройство датчиков и соответствующей электроники. Разд. 3 посвящен криогенному обеспечению. В разд. 4 приведены сведения о конструкции некоторых типов магнитометров. При этом особое внимание уделено связи сквидов с внешним полем, сверхпроводящей экранировке и криогенике. Применения магнитометров в биомагнетизме описаны в разд. 5.

Большинство приборов, обсуждающихся в разд. 4, работает в лаборатории гео- и палеомагнетизма Калифорнийского университета в Санта-Барбара. Они были сконструированы и изготовлены фирмой 2-G Enterprises и ее предшественницами. Теперь существуют и другие коммерческие поставщики сквид-магнитометрического оборудования; многие лаборатории конструируют его сами. Мы даем ссылки на публикации и об этих недавних разработках.

2. Принципы действия сквидов

2.1. Сверхпроводимость и измерение магнитного поля с помощью сквидов

Сверхпроводимость была открыта в 1911 г. Камерлинг-Оннесом вскоре после того, как ему удалось получить жидкий гелий. Он обнаружил, что при температуре, чуть большей 4 K, электрическое сопротивление ртути падает до неизмеримо малой величины. Впоследствии явление сверхпроводимости наблюдалось и для многих других металлов; два из них широко применяются в сверхпроводящих приборах — это олово и ниобий (температура перехода 7,2 и 9,2 K соответственно).

Разработка сквидов последовала за фундаментальными теоретическими и экспериментальными работами конца 50-х – начала 60-х годов, приведшими к созданию теории сверхпроводимости Бардина, Купера, Шриффера (теории БКШ) (Bardeen, Cooper, Schrieffer, 1957), а затем к предсказанию (Josephson, 1962) и наблюдению (Anderson, Rowell, 1963) туннелирования куперовских пар.

Сверхпроводящее состояние характеризуется прежде всего тем, что сопротивление металла при постоянном токе равно нулю. Феноменологическое описание этого явления основано на так называемой двухжидкостной модели, в которой предполагается, что ниже температуры перехода часть электронов как бы конденсируется в сверхпроводящее состояние, и при понижении температуры в этом состоянии оказывается все большая доля электронов. В сверхпроводнике, находящемся в постоянном электрическом поле, ток переносится исключительно такими «сверхпроводящими» электронами, распространяющимися в кристаллической решетке металла без рассеяния. В переменном же поле часть энергии передается «обычным» электронам, и возникает отличное от нуля сопротивление.

Другое явление, характерное для сверхпроводящего состояния, — это выталкивание магнитного потока, или эффект Мейснера. Он состоит в том, что на поверхности тела, находящегося во внешнем магнитном поле, при переходе в сверхпроводящее состояние возникают токи, магнитное поле которых в точности компенсирует поле в объеме тела. Известно, что обычно эффект Мейснера не бывает полным, поскольку часть потока все-таки захватывается внутри сверхпроводящего металла. Это обстоятельство связано с наличием в реальных металлах неоднородностей, на которых и происходит закрепление («пиннинг») захваченного потока, так что именно такое состояние оказывается энергетически более выгодным по сравнению с состоянием, когда поток полностью вытолкнут. Проблема захватывания потока является одной из самых серьезных при создании сверхпроводящих магнитных экранов. Заметим, что из-за эффекта Мейснера при сверхпроводящем переходе происходит существенное изменение магнитного поля в сверхпроводнике и его окрестности.

По характеру поведения в магнитном поле сверхпроводники подразделяются на две группы. К первой группе, называемой сверхпроводниками первого рода, относятся мягкие металлы — такие как свинец, олово и ниобий, с температурами перехода, не превышающими 9 K. В сверхпроводниках первого рода наблюдается полное выталкивание потока в полях, меньших критического H_c, которое обычно не превышает 1 000 Гс. К сверхпроводникам второго рода относятся механически более твердые материалы — в основном сплавы и различные соединения. Для них значения критических полей выше — до 10^5 Гс, а температура перехода достигает 21,5 K. В этих материалах поток полностью выталкивается только в том случае, если внешнее поле не превосходит нижнего критического значения H_{c1}, которое составляет $\sim 10^2$ Гс. При больших полях магнитный поток начинает проникать внутрь образца, который, однако, продолжает сохранять сверхпроводящие свойства, пока поле не достигнет верхнего критического значения H_{c2}. Здесь сверхпроводимость исчезает, и металл переходит в обычное состояние. Сверхпроводники первого рода используются в случаях малых значений поля для магнитного экранирования, например в магнитометрах, применяющихся для исследования горных пород (см. ниже). В случае сильных магнитных полей необходимо применять сверхпроводники второго рода. Большинство сквидов также изготавливается из этих материалов, обычно из нагартованных ниобия или сплава ниобий — титан.

Согласно квантовомеханическим представлениям, часть электронов в сверхпроводнике находится в определенном макроскопическом состоянии, которое описывается одной волновой функцией. Эта идея была

предложена Фрицем Лондоном и основывалась на его концепции дальнего порядка в пространстве импульсов. Впоследствии Гинзбург и Лондон ввели в теорию параметр порядка, характеризующий сверхпроводящее состояние.

Микроскопическая теория сверхпроводимости (Bardeen et al., 1957) была создана после того, как удалось установить, что в сверхпроводниках существует слабое притяжение между некоторыми электронами, связывающее их в пары. Благодаря этому взаимодействию и возникает соответствующее упорядочение, отмеченное впервые Лондоном. Представление о коррелированном движении электронов позволяет просто объяснить отсутствие в сверхпроводнике обычного электрического сопротивления, которое, как известно, возникает из-за рассеяния электронов проводимости на атомах кристаллической решетки. Если движение большой группы электронов согласовано, то рассеяние одного электрона будет лишь слабо возмущать движение группы как целого. Именно поэтому рассеяние электронов почти не влияет на ток в сверхпроводнике. Важность представления о коррелированном движении электронов для объяснения явления сверхпроводимости оценил еще Лондон. Однако до создания теории БКШ не удавалось точно описать это явление, поскольку не был выявлен тот факт, что ток в сверхпроводнике создается не отдельными электронами, а парами электронов. Притяжение между электронами в паре возникает в результате их взаимодействия с колебаниями кристаллической решетки. Образно говоря, один из электронов пары притягивается к «кильватерной струе», оставляемой другим электроном при его движении сквозь решетку. Такие пары взаимодействующих электронов принято называть куперовскими.

Важную роль в работе сквид-магнитометра играет квантование магнитного потока в кольце из сверхпроводника, которое было предсказано Лондоном (London, 1950), а наблюдалось Дивером и Фейрбэнком (Deaver, Fairbank, 1961) одновременно с Доллом и Набауэром (Doll, Nabauer, 1961). Охлаждение кольца из сверхпроводящего материала во внешнем магнитном поле до температуры, меньшей температуры перехода, приводит вследствие эффекта Мейснера к выталкиванию потока из материала кольца; при этом часть потока захватывается в отверстии. Захваченный поток всегда кратен кванту потока $\Phi_0 = h/2e$, где $h = 6{,}624 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка, $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона. Если поток, создаваемый внешним полем в отверстии кольца, не равен целому числу квантов потока, то на поверхности кольца возникает ток, необходимый для выполнения условий квантования суммарного потока в отверстии от внешних источников и от токов на поверхности. Квант потока Φ_0 составляет $2{,}07 \cdot 10^{-15}$ Вб, или $2{,}07 \cdot 10^{-7}$ Мкс, так что соответствующий ток в кольце обычно очень мал.

Явление квантования потока нашло практическое применение только после того, как на основе теории, разработанной Джозефсоном

(Josephson, 1962), были созданы приборы для измерения магнитного поля. Джозефсон рассмотрел прохождение тока через тонкий слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника. В таком устройстве, называемом контактом Джозефсона (рис. 4.1), волновые функции куперовских пар сохраняют конечные значения и за пределами сверхпроводников, определяя, таким образом, возможность перехода пар через диэлектрический барьер.

Типичные контакты Джозефсона в отсутствие сверхпроводимости имеют сопротивления порядка нескольких ом. С возникновением сверхпроводящего состояния при достаточно низкой температуре сопротивление исчезает и начинается туннелирование куперовских пар через барьер при нулевом напряжении на приборе.

Чтобы понять, как это происходит, вернемся к основному в теории сверхпроводимости представлению о коррелированном движении куперовских пар с одинаковыми фазами волновых функций. В джозефсоновском контакте два сверхпроводника находятся так близко друг к другу, что из-за туннелирования устанавливается определенная разность фаз между волновыми функциями пар по разные стороны контакта. Джозефсон предсказал, что в этом случае пары будут двигаться преимущественно в одном направлении, так чтобы пара, преодолев диэлектрический барьер, оказалась на другой его стороне в фазе, соответствующей фазе пар в этой области. Переходов в обратном направлении, вообще говоря, не будет, поскольку при этом не возникает равенства фаз туннелирующих пар и пар в сверхпроводнике за барьером. Таким образом, ток через контакт оказывается зависящим от разности фаз волновых функций куперовских пар в сверхпроводниках по разные его стороны.

Фаза куперовских пар является функцией векторного потенциала A внешнего магнитного поля. Поэтому приложение поля к джозефсоновскому контакту приводит к изменению фазовых соотношений и, следовательно, к пространственной модуляции тока в контакте. Это

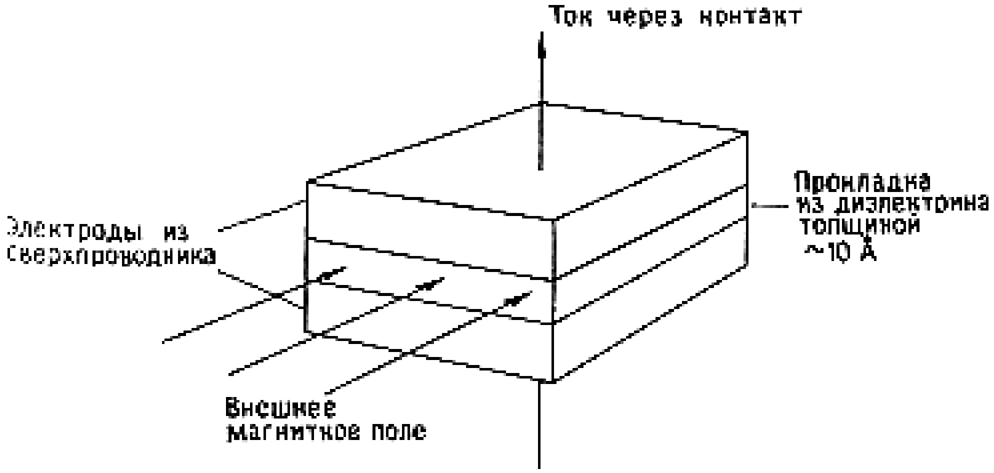


Рис. 4.1. Джозефсоновский контакт.

показано в верхней части рис. 4.2 вертикальными стрелками, длина которых пропорциональна плотности тока. Суммарный ток через контакт в этой ситуации характерным образом зависит от внешнего магнитного поля (рис. 4.2), что позволяет измерять магнитное поле таким прибором. Однако его чувствительность мала, поскольку для создания потока, равного одному кванту, через обычно очень малую площадь поперечного сечения перехода нужно сравнительно большое поле H_0. Чтобы существенно повысить чувствительность к магнитному полю, можно использовать два контакта Джозефсона.

Рассмотрим такое применение джозефсоновских контактов на примере разработанного Кларком (Clarke, 1974) сквида постоянного тока (ПТ-сквида). Устройство состоит из двух одинаковых контактов, включенных в сверхпроводящее кольцо так, как это схематически показано на рис. 4.3. Через прибор пропускается постоянный ток смещения I. В отсутствие внешнего магнитного поля этот ток равен просто удвоенному току, текущему через каждый из контактов. Когда перпендикулярно плоскости кольца приложено поле, то его векторный потенциал направлен вдоль тока в половине кольца, содержащего один из контактов, и навстречу току в другой его половине. В результате эти два тока интерферируют в точке P с разностью фаз, зависящей от величины поля, так что максимумы полного тока достигаются, когда поток Φ_e внешнего

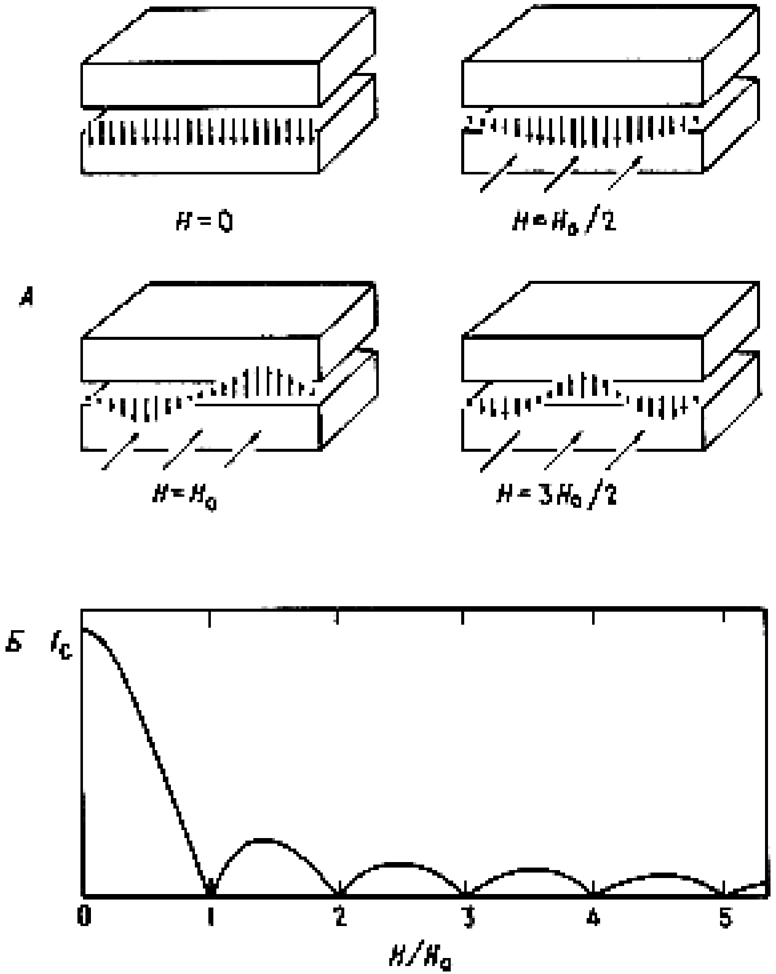


Рис. 4.2. *А*. Распределение тока в джозефсоновском контакте при различных значениях внешнего магнитного поля (длина стрелок пропорциональна плотности тока). *Б*. Зависимость силы тока через контакт от магнитного поля.

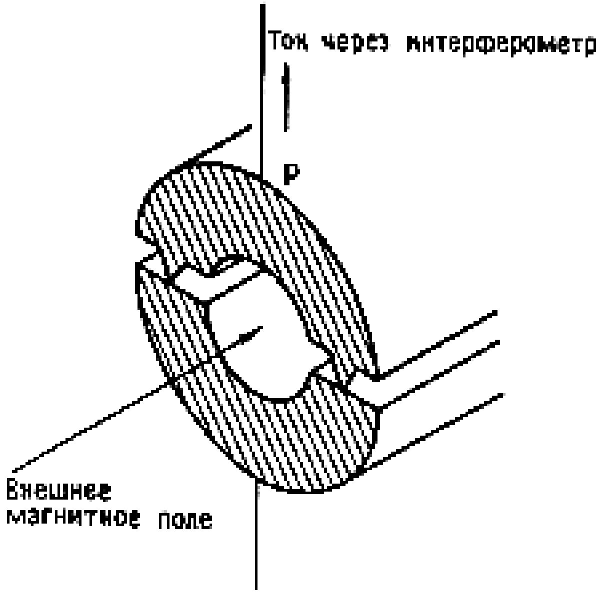


Рис. 4.3. Сверхпроводящее кольцо с двумя джозефсоновскими контактами.

поля через площадь кольца кратен кванту потока Φ_0. Зависимость полного тока от потока внешнего поля (рис. 4.4) аналогична зависимости интенсивности света от длины волны при дифракции Фраунгофера на двух щелях. Интерференционный характер явлений, происходящих в приборах, подобных рассмотренному, отражен в их названии – сверхпроводящие квантовые интерференционные датчики. В сквидах джозефсоновские контакты включены в сверхпроводящее кольцо, площадь которого значительно больше, чем площадь поперечного сечения контакта. Это и приводит к существенному увеличению чувствительности таких приборов к магнитному полю.

В магнитометрах, применяющихся в биологии и геофизике, до сих пор использовались в основном не ПТ-сквиды, которые могут обеспечить более высокую чувствительность, а высокочастотные сквиды (ВЧ-сквиды). Состояние сверхпроводящего кольца в таких приборах определяют методами радиочастотной электроники. Сверхпроводящее кольцо ВЧ-сквида включает один джозефсоновский контакт (или так называемое слабое звено), через который может идти сверхпроводящий ток. Размеры контакта, переходящего в определенные моменты работы сквида в нормальное состояние, для достижения необходимых характеристик устройства должны быть достаточно малы по сравнению с размерами кольца.

Как уже отмечалось, в сверхпроводящем кольце при изменении

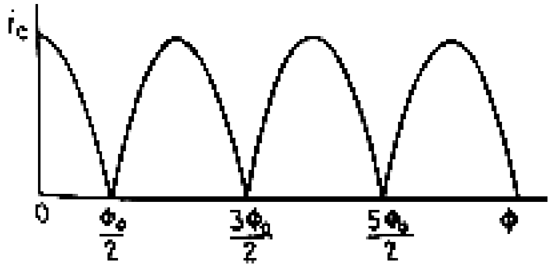


Рис. 4.4. Зависимость критического тока через интерферометр от потока внешнего магнитного поля.

внешнего магнитного поля в соответствии с законом Фарадея–Ленца возникает ток. Если значение этого тока превосходит критическое, то квант потока либо проникает внутрь кольца, либо покидает его в зависимости от того, растет или убывает внешнее поле. Чтобы создать магнитометр на основе сквида, необходимо иметь возможность наблюдать за изменением сверхпроводящего тока в кольце датчика и фиксировать число квантов потока, вошедших в кольцо или покинувших его. Эту задачу можно решить, используя индуктивно связанную с кольцом катушку, в которой указанные процессы будут индуцировать ЭДС. Измерение этих малых сигналов с помощью специальных электронных устройств, описанных ниже, позволяет определять величину внешнего магнитного поля.

С помощью сквида можно проследить за изменением поля с момента перехода датчика в сверхпроводящее состояние. Высокая чувствительность, достигаемая при таких измерениях, обусловлена характером периодической зависимости напряжения на выходе прибора от потока в кольце сквида. Период этой зависимости равен по порядку величины 10^{-15} Вб, и если состояние сквида может быть определено с разрешением 10^{-3}, то это означает, что чувствительность составляет 10^{-18} Вб. В следующем разделе работа магнитометра рассмотрена более детально.

2.2. Уравнения Лондонов и Джозефсона

Строгое рассмотрение квантовомеханических явлений, происходящих в сквидах, выходит за рамки данной статьи. Тем не менее представляется полезным остановиться на уравнениях Лондонов и Джозефсона. Читатель, интересующийся главным образом практическими аспектами работы магнитометров, может пропустить этот раздел. Приводимые здесь уравнения записаны в системе СГС.

Волновая функция квантового макроскопического состояния, описывающего сверхпроводящие электроны в металле, может быть представлена в виде

$$\psi = \rho^{1/2} \exp(i\delta), \tag{1}$$

где $\rho = \psi\psi^*$ – амплитудная функция, значения которой равны концентрации куперовских пар, а δ – фазовая функция.

Волновая функция сверхпроводящего состояния удовлетворяет уравнению Шредингера

$$\frac{1}{2m}\left(\frac{\hbar}{i}\nabla - \frac{e}{c}A\right)^2 \psi + V\psi = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}, \tag{2}$$

где e и m – заряд и масса пары сверхпроводящих электронов. Для плотности сверхпроводящего тока получается следующее выражение:

$$J_s = \frac{e\hbar\rho}{2mi}(\psi^*\nabla\psi - \psi\nabla\psi^*) - e^2 A\,\frac{\psi\psi^*}{mc}, \tag{3}$$

которое можно представить в виде

$$J_s = \frac{e\hbar\rho}{m}\left(\nabla\delta - \frac{eA}{\hbar c}\right), \tag{4}$$

если использовать формулу (1) для волновой функции.

Уравнение Лондонов, описывающее электромагнитные явления в сверхпроводниках, можно получить из уравнения (4), если рассмотреть сплошной образец сверхпроводящего материала, внутри которого фазовая функция δ постоянна, т. е. $\nabla\delta = 0$. Тогда

$$J_s = -\frac{e^2\rho}{mc}A\,. \tag{5}$$

В силу этой однородности фазовая функция связана с обобщенным импульсом (механическим моментом) p_s куперовской пары соотношением

$$\Delta\delta = \frac{1}{\hbar}\int p_s ds\,, \tag{6}$$

где $\Delta\delta$ – разность фаз между конечными точками траектории, вдоль которой вычисляется линейный интеграл. Обобщенный импульс в квантовой механике определяется через скорость V_s частицы и векторный потенциал магнитного поля A:

$$p_s = mV_s + (e/c)\,A\,. \tag{7}$$

Сверхпроводящее состояние замечательно тем, что здесь сугубо квантовомеханические закономерности приводят к явлениям, легко наблюдаемым в макроскопических масштабах. Квантование потока, например, является следствием соотношения (6), если интеграл в правой его части брать по замкнутому контуру, охватывающему отверстия, имеющиеся внутри сверхпроводящего тела. При этом однозначность волновой функции означает, что соответствующее изменение фазы $\Delta\delta$ должно быть кратно 2π, т. е.

$$\Delta\delta = \oint\nabla\delta ds = \frac{2\pi mc}{\Phi e^2\rho}\oint J_s ds + \frac{2\pi}{\Phi_0}\oint A ds = 2\pi n\,, \tag{8}$$

где $\Phi_0 = hc/e$, а n – целое число. Для цилиндрической трубы с достаточно толстой стенкой при интегрировании вдоль контура, охватывающего ее полость, уравнение (8) сводится к условию квантования потока Φ в полости

$$\Phi = n\Phi_0. \tag{9}$$

Стенка трубы должна быть достаточно толстой, чтобы контур интегрирования лежал на достаточном удалении от поверхности тела и выполнялось условие $J_s = 0$.

Явления в контакте Джозефсона также можно проанализировать с использованием упомянутого выше формализма квантового макроскопического состояния (Silver, Zimmerman, 1967; Feynman et al., 1965; Mercereau, 1967). Когда два сверхпроводящих тела расположены достаточно близко друг к другу, микроскопические волновые функции куперовских пар, находящихся по разные стороны от щели, разделяющей эти тела, могут перекрываться, в результате чего пары будут переходить (точнее, туннелировать) из одного тела в другое. Динамика такой системы описывается уравнениями

$$\frac{\partial\psi_1}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar}(\varepsilon_1\psi_1 + \varepsilon\psi_2), \qquad (10)$$

$$\frac{\partial\psi_2}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar}(\varepsilon_2\psi_2 + \varepsilon\psi_1), \qquad (11)$$

где ε – малый коэффициент связи. Теперь, подставляя в систему уравнений (10) и (11) выражения для волновых функций

$$\psi_1 = \rho_1^{1/2}\exp(i\delta_1), \qquad (12)$$

$$\psi_2 = \rho_2^{1/2}\exp(i\delta_2) \qquad (13)$$

и приравнивая отдельно мнимые и действительные части получающихся таким образом формул, можно вывести уравнения движения для амплитудных и фазовых функций куперовских пар:

$$\dot\rho_1 = (2/\hbar)\varepsilon\rho\sin(\delta_2 - \delta_1) = -\dot\rho_2, \qquad (14)$$

$$\dot\delta_2 - \dot\delta_1 = (1/\hbar)(\varepsilon_2 - \varepsilon_1). \qquad (15)$$

Используя соотношение

$$J_s = I_s/\sigma = e\dot\rho\tau/2\sigma, \qquad (16)$$

где I_s – ток в контакте Джозефсона, σ – площадь области, через которую туннелируют куперовские пары, τ – объем сверхпроводящей области, преобразуем (14) и (15) в уравнения, обычно называемые уравнениями Джозефсона:

$$J_s = (e\rho\tau\varepsilon/\sigma\hbar)\left[\sin(\delta_2 - \delta_1) - \frac{2\pi}{\Phi_0}\int A\,ds\right], \qquad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[(\delta_2 - \delta_1) - \frac{2\pi}{\Phi_0}\int A\,ds\right] = -\left(\frac{1}{\hbar}\right)(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) = 2eV/\hbar. \qquad (18)$$

Здесь V – разность потенциалов между двумя сторонами контакта. Член с векторным потенциалом A введен для того, чтобы удовлетворить требованию калибровочной инвариантности. Последнее уравнение представляет собой следствие того факта, что туннельный ток переносится парами электронов, находящимися вблизи поверхности Ферми.

Анализ уравнений Джозефсона позволяет описать картину, возни-

кающую при сближении двух сверхпроводников до достаточно малого расстояния. При этом прежде всего возникает ток, приводящий к выравниванию фаз волновых функций по разные стороны контакта. Равновесие достигается, когда ε_1 и ε_2, а также δ_1 и δ_2 становятся одинаковыми и ток перестает течь. Если контакт подсоединить к источнику тока, то на нем возникает разность фаз $\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1$, удовлетворяющая уравнению (17). При изменениях тока через контакт на нем в соответствии с уравнением (18) будет появляться разность потенциалов, исчезающая при установлении нового равновесного значения тока и соответствующей разности фаз $\Delta\delta$. Наибольшая плотность тока, которую пропускает контакт при нулевой разности потенциалов, определяется уравнением (17) при $\Delta\delta = \pi/2$ и $A = 0$.

2.3. Конструкции высокочастотных сквидов

Высокочастотный сквид состоит из сверхпроводящего кольца или петли с индуктивностью L, которое прервано контактом Джозефсона, называемым иначе «слабым звеном». В ранних экспериментальных работах слабое звено получали различными способами: нанося каплю припоя на кусочек проволоки, делая пропилы специальной формы в цилиндрической пленке и т. д. Основными факторами, определяющими качество сквида, являются его индуктивность, возможность эффективной и контролируемой связи с внешним магнитным потоком, стабильность характеристик. Эти факторы зависят от геометрии датчика. Мы опишем две конструкции датчика – мостик Дайема (Dayhem) и точечный контакт, которые чаще всего использовались в магнитометрах, обсуждающихся в данной главе. Обе эти конструкции не являются контактами Джозефсона в строгом смысле, однако сквиды и с этими типами переходов имеют на выходе сигнал, который является периодической функцией внешнего магнитного поля $\boldsymbol{B}$.

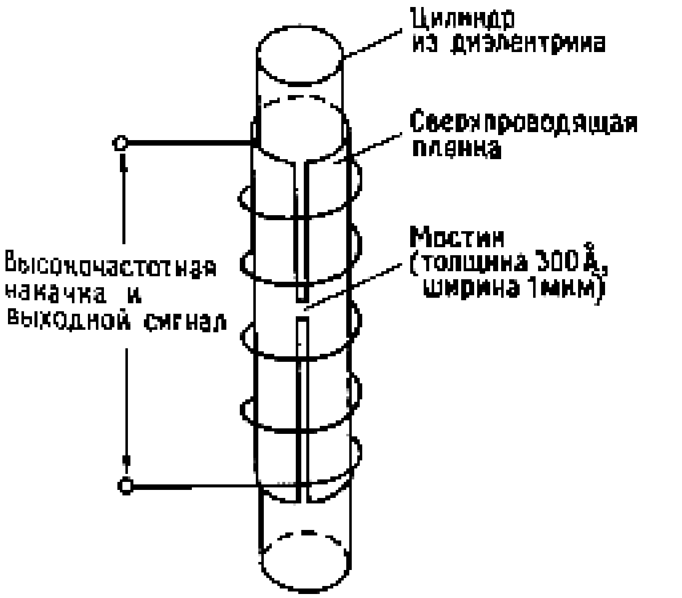


Рис. 4.5. Устройство сквида с мостиком Дайема.

На рис. 4.5 показано устройство сквида с мостиком Дайема. Мостик получают, делая прорези в тонкой пленке сверхпроводящего материала, наносимой на кварцевый цилиндр. Через мостик проходит весь ток, циркулирующий в кольце сквида, и эта область некоторую часть цикла

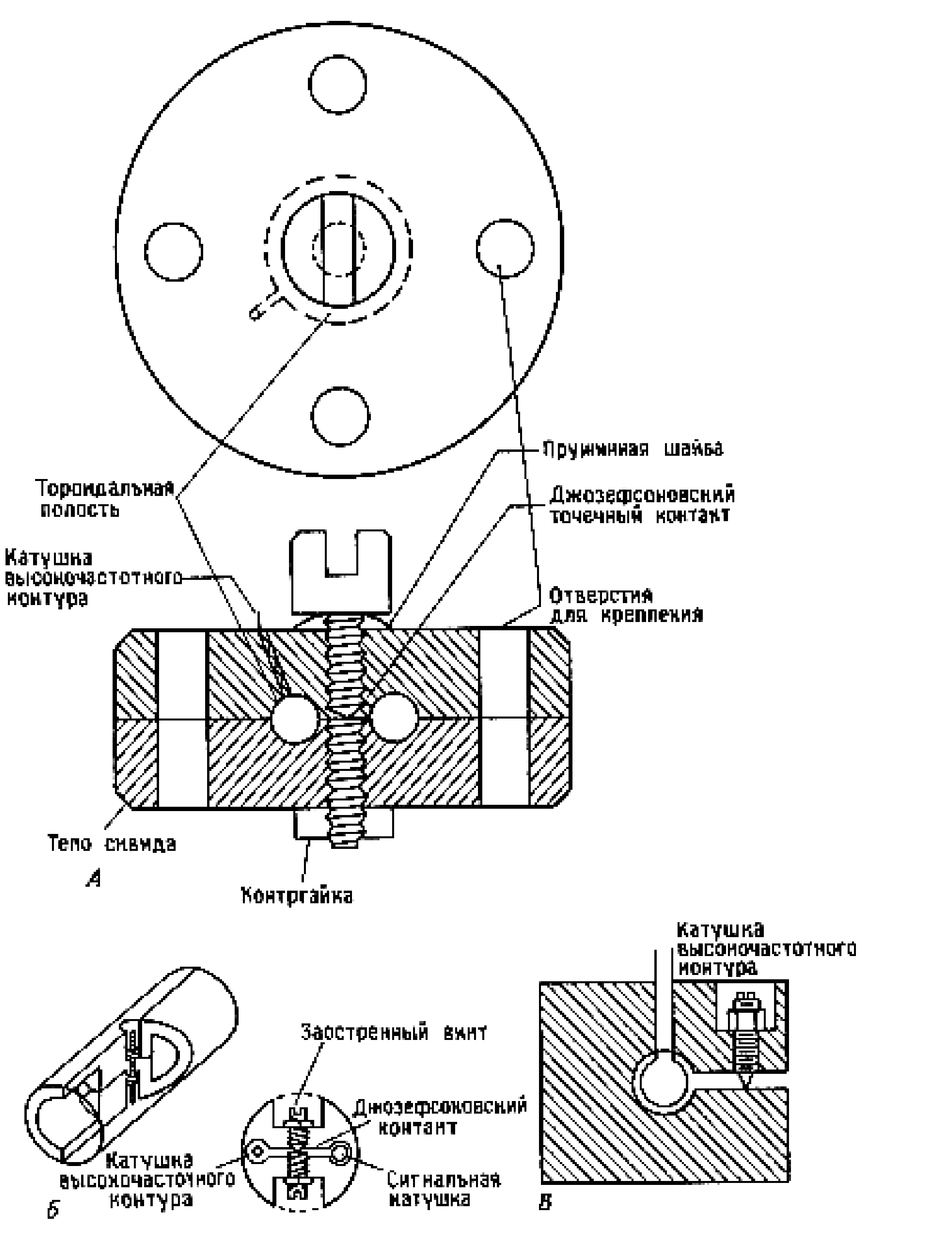


Рис. 4.6. Конструкции сквидов с точечными контактами. *А*. Тороидальный сквид, *Б*. Двухдырочный сквид, *В*. Простейший однодырочный сквид.

работы датчика может находиться в нормальном (не сверхпроводящем) состоянии. Высокочастотное поле на сквиде создается специальной катушкой, напряжение на которой и является выходным напряжением датчика. Сквиды с мостиком Дайема использовались во многих ранних конструкциях магнитометров, изготавливавшихся для палеомагнитных исследований. В то время этот тип сквидов предпочитали сквидам с точечным контактом из-за недостаточной механической стабильности последнего. Слабым звеном сверхпроводящего кольца в сквидах с точечным контактом служит область соприкосновения заостренного ниобиевого винта с поверхностью детали из того же материала. Конструкция простейшего сквида этого типа показана на рис. 4.6, *В*. Такая простая конструкция была затем заменена двухдырочной (рис. 4.6, *Б*), а позже – тороидальной (рис. 4.6, *А*). Полость тороидального сквида можно рассматривать при этом как замкнутые друг на друга цилиндрические полости двухдырочного сквида. Сейчас наиболее распространена тороидальная конструкция высокочастотных сквидов.

В некоторых случаях, особенно для тороидальных сквидов, чувствительность прибора можно повысить, уменьшив индуктивность датчика. Поэтому кольцо сквида изготавливают не просто в виде проволочной петли, а стараются сформировать достаточно длинные цилиндр или тороид с тем, чтобы по возможности свести индуктивность датчика к индуктивности самого контакта.

Важным обстоятельством, определяющим выбор той или иной конструкции датчика, является предполагаемый способ его связи с внешним магнитным потоком. Иногда сквид используют таким образом, что измеряемым потоком является поток, непосредственно пронизывающий петлю датчика. Однако чаще сквид связывают с измеряемым магнитным полем посредством так называемого трансформатора потока. В этом случае в отличие от предыдущего петля сквида должна быть достаточно хорошо заэкранирована от окружающих полей, а это достигается наилучшим образом при тороидальной конструкции. Устройство трансформаторов потока описано ниже. Здесь мы только заметим, что выходная катушка датчика должна быть как можно более эффективно связана с его кольцом для лучшей передачи изменений потока в приемной катушке трансформатора.

Проблемы, возникающие из-за сжатия датчика при охлаждении прибора до низких температур, решаются путем выбора правильной конструкции. При симметричной конфигурации обычно наблюдается достаточная стабильность перехода при последовательных циклах охлаждения датчика до рабочей температуры и отогревания до комнатной.

Для сквидов с точечным контактом такая стабильность достигается с трудом, поскольку для этого необходимо, чтобы область перехода толщиной порядка 100 Å, где происходит туннелирование сверхпроводящих электронов, обладала достаточной механической прочностью. Практически во всех обсуждавшихся выше аспектах оптимальной явля-

ется тороидальная конструкция сквида. В этой конструкции слабое звено, как правило, помещается в центр тороида.

Существует несколько типов контактов и способов их изготовления. О двух из них мы уже говорили – это мостик и точечный контакт. Обычно используют чистые и окисленные контакты. Опыт показывает, что если острие окисленного контакта покрыто толстой пленкой оксида ниобия, то его термостабильность улучшается. Иногда в качестве стабилизирующего покрытия используют пленки из полупроводниковых материалов.

По-видимому, наиболее надежны контакты, изготавливаемые с помощью современных тонкопленочных технологий. Разработаны специальные методы создания контактов Джозефсона путем последовательного напыления сверхпроводящих материалов и разделяющих диэлектрических или полупроводящих пленок. Часто в качестве подложки для таких микросхем используют тонкую пластину из кремния, на которую напыляют также плоские проводники и контакты для соединения с остальной частью датчика, например с объемной тороидальной полостью. Существенную трудность представляет создание надежного контакта между плоской и объемной частями такой гибридной конструкции. Известна, однако, технология, уже используемая при изготовлении коммерческих сквидов, по которой пленки напыляют прямо на изолированную подложку из ниобия.

2.4. Электроника

Блок-схема типичной электронной системы, обычно используемой в ВЧ-сквидах, показана на рис. 4.7 (см. также Forgacs, Warnick, 1967). Датчик возбуждается синусоидальным высокочастотным полем, имеющим амплитуду, достаточную для достижения критического тока. Частота этого поля (называемого часто полем накачки) обычно лежит в диапазоне 20–30 МГц. Поле накачки создают с помощью катушки, помещаемой в полость сквида (рис. 4.6).

Применение во входном каскаде предусилителя, усиливающего сигналы от сквида, транзисторов с низким уровнем шумов, имеющих оптимальные характеристики при входном сопротивлении в несколько килоом, требует согласования с малым (порядка 1 Ом) импедансом сквида. Для такого согласования обычно используют резонансный контур, индуктивностью которого служит катушка, создающая поле накачки. Добротность контура в соответствии с известным соотношением должна быть равна квадратному корню из отношения входного сопротивления предусилителя к импедансу сквида.

При правильно выбранной амплитуде поля накачки ток в сквиде превосходит критическое значение дважды в течение каждого периода, приводя к проникновению магнитного потока в кольцо сквида, что в свою очередь индуцирует соответствующую ЭДС в высокочастотной катушке. Детали процесса проникновения потока в кольцо сквида

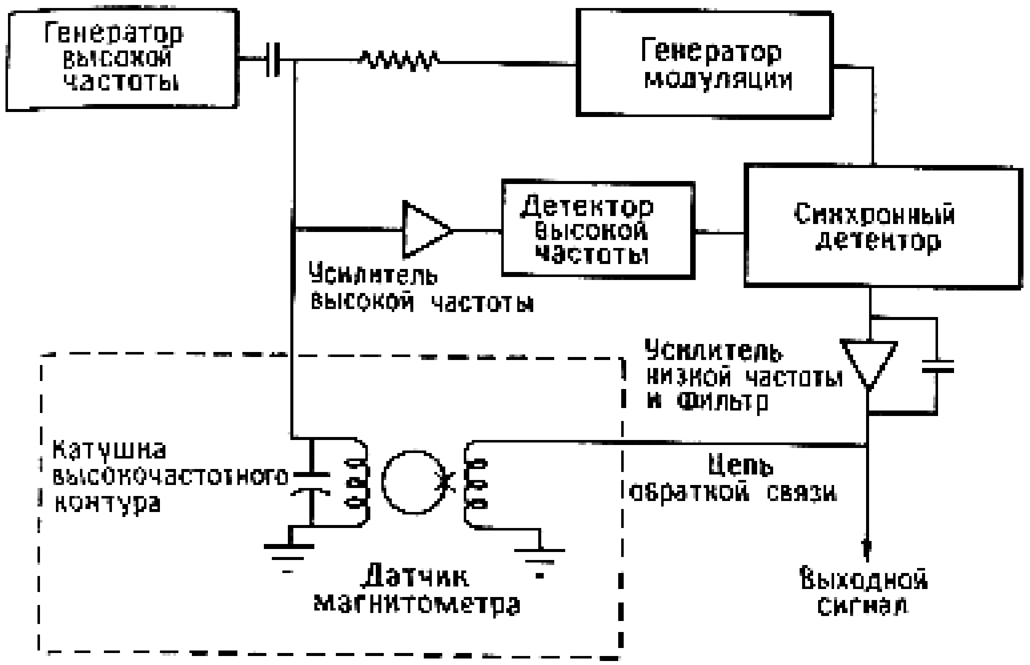


Рис. 4.7 Блок-схема электронной системы регистрации сигналов высокочастотного сквида. Часть системы, очерченная пунктиром, находится при температуре жидкого гелия.

определяются характеристиками контакта, в особенности точным видом соотношения между током через слабое звено и разностью фаз волновых функций куперовских пар по разные стороны слабого звена. Существует, однако, простая качественная модель такого процесса, хорошо описывающая большинство наблюдаемых при этом явлений (Silver, Zimmerman, 1967). В этой модели предполагается, что сквид полностью «самоэкранирован», пока ток через слабое звено не превосходит критического значения. Когда же ток становится больше критического по абсолютной величине, квант потока либо проникает в кольцо, либо выходит из него в зависимости от того, увеличивается или уменьшается внешнее магнитное поле. Проникновение или выход кванта потока сопровождается возбуждением импульсов напряжения в контуре, связанном со сквидом. Фаза всех этих событий (достижение током критического значения, вход или выход кванта потока, возникновение импульсов напряжения в контуре) по отношению к фазе поля накачки определяется величиной постоянной составляющей Ф магнитного потока, пронизывающего кольцо сквида (рис. 4.8). Амплитуда высокочастотного напряжения на контуре также оказывается связанной с этой составляющей магнитного потока зависимостью

$$V_m \propto \cos(2\pi\Phi/\Phi_0). \qquad (19)$$

Это похоже на ситуацию в феррозондовом магнитометре – приборе, хорошо знакомом многим геофизикам.

Таким образом, регистрируя амплитуду высокочастотного напряжения на контуре, связанном со сквидом, можно измерять магнитный поток в кольце датчика. При реализации такой схемы измерений

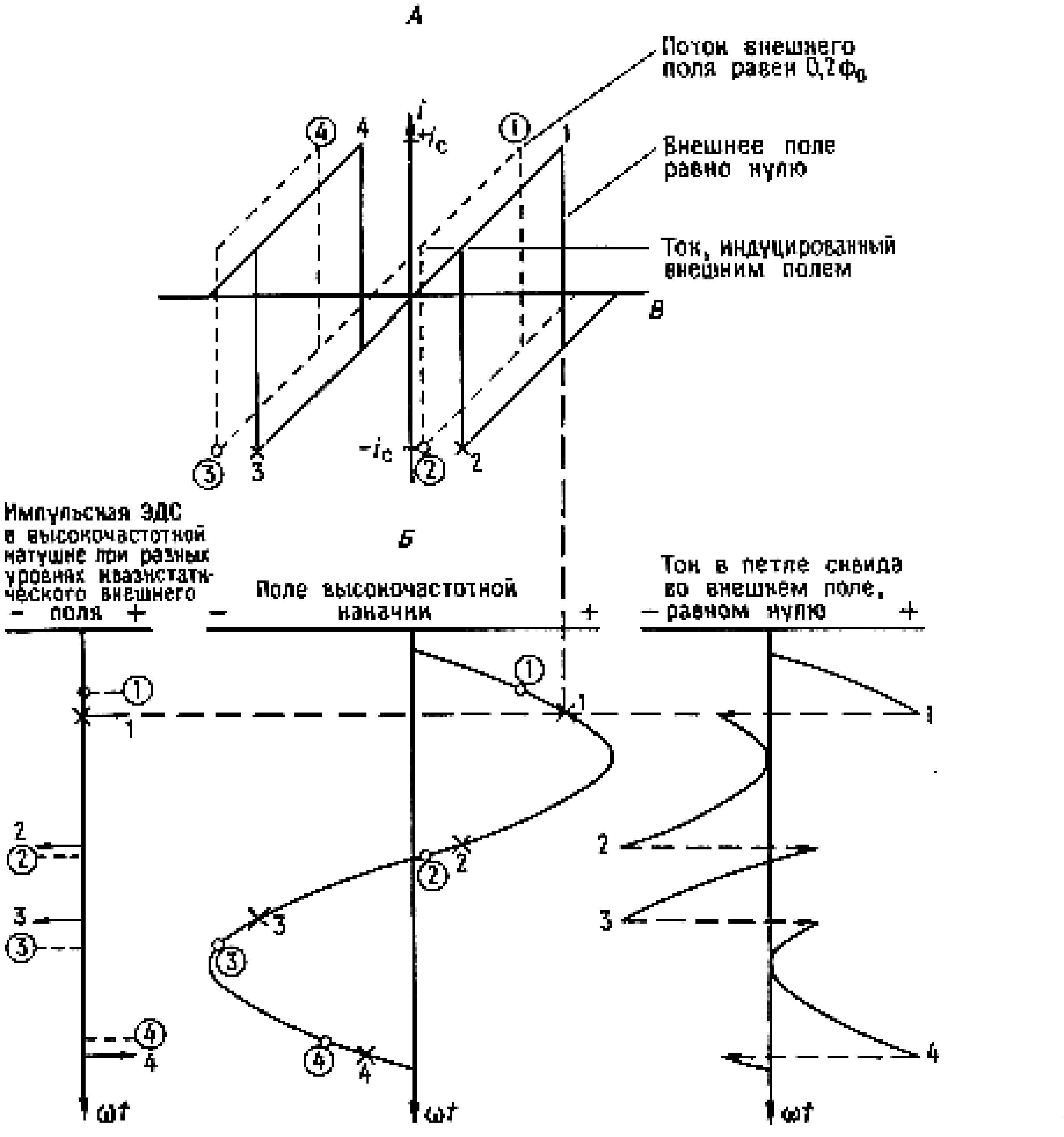


Рис. 4.8. Измерение поля с помощью сквида. *А*. Зависимость тока в петле сквида от поля накачки *B* при разных уровнях квазистатического внешнего поля. *Б*. Временные диаграммы физических процессов в сквиде. Сплошные линии – внешнее поле равно нулю, пунктирные – поток внешнего поля равен $0{,}2\Phi_0$.

возникают две проблемы. Первая состоит в том, что часто встречающуюся задачу наблюдения за сравнительно низкочастотными сигналами (обычно < 1 кГц) трудно решить, обрабатывая такие сигналы непосредственно, из-за сильного влияния всевозможных дрейфов на низкочастотную электронику. Вторая проблема связана с нелинейностью зависимости выходного напряжения датчика от величины измеряемого потока. Это обстоятельство сильно затрудняет проведение точных измерений с большим динамическим диапазоном из-за того, что чувствительность к потоку изменяется периодически, достигая максимума при

$$\Phi = \left(\frac{n}{2} + \frac{1}{4}\right)\Phi_0, \quad n = 0, \pm 1, \ldots . \tag{20}$$

Для решения первой проблемы вводят дополнительную низкочастотную модуляцию потока в кольце сквида (обычно с частотой около 50 кГц) и измеряют амплитуду E_m соответствующей частотной составляющей напряжения на контуре датчика. Для значений магнитного потока, меньших Φ_0, E_m в первом приближении пропорциональна производной функции $V_m(\Phi)$. Т. е. в соответствии с формулой (19)

$$E_m \propto \sin(2\pi\Phi/\Phi_0). \tag{21}$$

Следовательно, E_m также представляет собой периодическую функцию измеряемого потока Ф и может служить его мерой. В то же время величина E_m, являясь амплитудой сигнала сравнительно высокой частоты, менее подвержена влиянию температурных и других возмущений. На частоте дополнительной модуляции легко осуществить также синхронное детектирование, которое может сильно увеличить отношение сигнал/шум.

Вторая проблема, связанная с нелинейностью зависимости выходного напряжения сквида от магнитного потока Ф, может быть решена введением отрицательной обратной связи с использованием сквида в качестве нуль-детектора для удержания магнитометра в рабочей точке, соответствующей максимальной чувствительности. Блок-схема подобного устройства приведена на рис. 4.7. В такой системе изменение потока в кольце сквида приводит к возникновению в цепи обратной связи тока, который, протекая через катушку накачки, компенсирует вызвавшее его изменение потока.

Чтобы увеличить динамический диапазон магнитометра, нужно несколько модифицировать цепь обратной связи. Часто предусматривают ряд диапазонов чувствительности, для которых полная шкала выходного индикатора соответствует потоку, равному 1, 10 и 100 Φ_0. В диапазоне $1\Phi_0$ чувствительность прибора определяется разрешением, с которым может быть измерен ток в цепи обратной связи. Эта чувствительность обычно превосходит величину $10^{-3}\Phi_0$. Как правило, в электронную схему прибора вводят устройство, которое производит процедуру установки на нуль тока в цепи обратной связи, когда поток достигает величины, максимальной для данного диапазона чувствительности, например 1, 10 или 100 Φ_0. В результате на сквид подается полный поток с измерительной катушки, достаточный для того, чтобы индуцировать в кольце ток, больший критического, и вызвать проникновение кванта потока в кольцо при росте потока. На начальном этапе конструирования сквид-магнитометров большое значение придавали стабильности описанной процедуры, и для ее обеспечения схему установки на нуль делали относительно медленной (постоянная времени порядка нескольких миллисекунд). В настоящее время благодаря

использованию схем установки на нуль с постоянной времени порядка микросекунд удалось значительно расширить динамический диапазон. При этом производится подсчет числа актов достижения нуля, т. е. числа вошедших или покинувших кольцо сквида квантов потока. На краю динамического диапазона прибора такой подсчет идет с максимальной возможной скоростью.

2.5. Связывание внешнего поля со сквидом с помощью трансформатора потока

Размеры кольца сквида определяются следующими соотношениями между его индуктивностью L_s, максимальным значением критического тока $i_{c,max}$ и рабочей температурой. Во-первых, выходной сигнал сквида зависит от амплитудной модуляции Δi_c критического тока магнитным потоком в кольце, и оптимальные условия достигаются, когда

$$i_c L_s \sim \Phi_0 . \qquad (22)$$

При этом Δi_c имеет тот же порядок величины, что и $i_{c,max}$. Во-вторых, энергия кванта потока в кольце сквида должна быть больше энергии тепловых флуктуаций, т. е.

$$\Phi_0^2/L_s \geqslant kT, \qquad (23)$$

где k – постоянная Больцмана ($1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), T – температура. При $T = 4$ К условия (22) и (23) дают для критического тока значение порядка нескольких микроампер, а для индуктивности L_s – значения порядка 10^{-9} Гн или меньше.

Кольцо сквида с такой индуктивностью имеет диаметр 1–2 мм, поэтому при проектировании магнитометров возникает задача оптимизации связи измеряемого магнитного поля с датчиком довольно малых размеров, которую обычно решают одним из трех способов. Оптимальную связь датчика с магнитным потоком, создаваемым образцом, обеспечивает первый способ (рис. 4.9, *А*), при котором образец помещают непосредственно в кольцо сквида. Правда, этот способ применим только для исследований небольших образцов при температуре жидкого гелия. Второй способ (рис. 4.9, *Б*), когда образец помещают как можно ближе к сквиду и измеряют магнитный поток рассеяния, дает худшую связь магнитного потока от образца с датчиком. К тому же эта связь сильно зависит от положения образца. Чаще всего используется третий способ (рис. 4.9, *В*) – связь с помощью трансформатора потока.

Широкое применение трансформаторов потока объясняется главным образом их универсальностью. Выбирая те или иные конструкции приемных катушек трансформатора, можно удовлетворить требованиям очень широкого круга экспериментов. На рис. 4.10 показана типичная конфигурация приемных катушек магнитометра, образующих вместе с

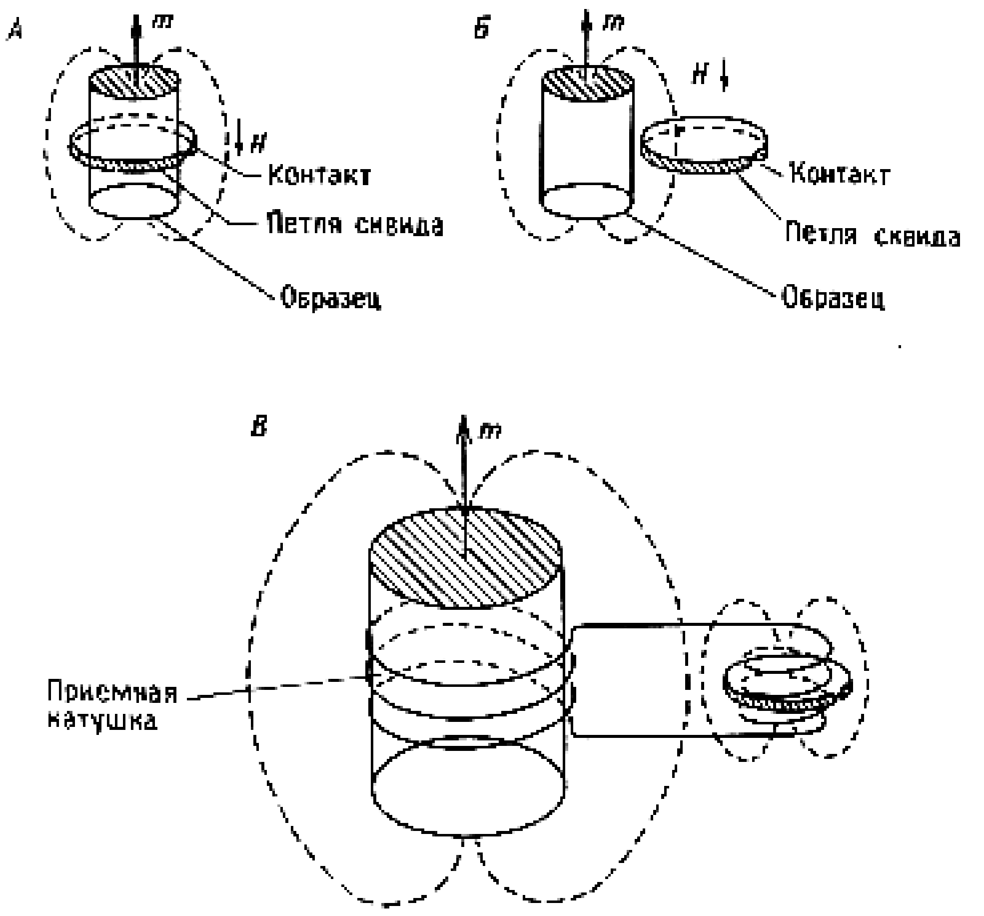


Рис. 4.9. Способы введения измеряемого магнитного потока в сквид. *А*. Образец находится внутри петли сквида, *Б* – образец находится со сквидом, *В* связь осуществляется через трансформатор потока.

сигнальной катушкой трансформатор потока, связанный со сквидом. Поскольку трансформатор потока при работе прибора находится в сверхпроводящем состоянии, его функция заключается в передаче изменений потока в кольцо датчика; этим он отличается от измерительной катушки индукционного магнитометра, ЭДС которой пропорциональна производной потока по времени ($\dot{\Phi}$). Трансформатор можно рассматривать также как малошумящий концентратор потока. Поля и потоки в рассматриваемом случае несложно рассчитать, учитывая, что фактически трансформатор потока представляет собой замкнутую петлю из сверхпроводника, поток в которой постоянен, т. е.

$$N_1 \Delta\Phi_1 + (L_1 + L_2) I_i = 0 . \qquad (24)$$

Здесь N_1 – число витков в приемной катушке 1, $\Delta\Phi_1$ – изменение магнитного потока через катушку 1, L_1 и L_2 – индуктивности приемной и сигнальной катушек, I_i – ток, индуцируемый при изменении потока в приемной катушке. Изменение $\Delta\Phi_s$ потока в сквиде, обусловленное изменением $\Delta\Phi_1$ потока в приемной катушке, определяется формулой

$$\Delta\Phi_s = M I_i , \qquad (25)$$

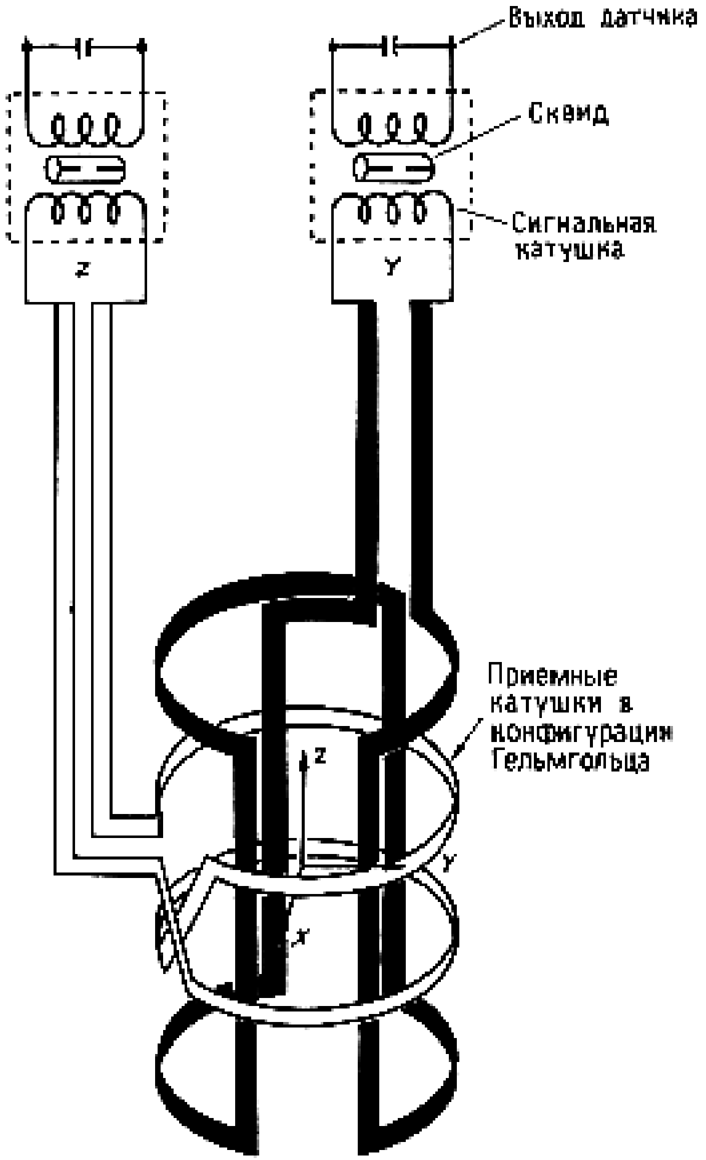


Рис. 4.10. Схема входных цепей сквид-магнитометра.

где M – взаимоиндукция кольца сквида и сигнальной катушки 2. Используя соотношение (24), формулу (25) можно представить в виде

$$\Delta\Phi_s = [MN_1/(L_1 + L_2)]\,\Delta\Phi_1\,. \qquad (26)$$

Здесь под L_2 подразумевается индуктивность сигнальной катушки в положении in situ, т.е. когда эта катушка находится в полости сквида. Индуктивность той же катушки, находящейся в свободном пространстве, L_{2FS} несколько отличается от L_2, а именно $L_2 = L_{2FS}(1 - k^2)^{1/2}$, где k определяется соотношением

$$M = k(L_2 L_s)^{1/2}. \qquad (27)$$

Поскольку коэффициент взаимоиндукции k обычно не превышает 0,6, то увеличение индуктивности сигнальной катушки из-за связи со сквидом составляет не более 25%.

Значение индуктивности L_2 можно выбрать так, чтобы поток, передаваемый трансформатором на сквид, был максимален. Дифференцируя уравнение (26) по L_2 в предположении постоянства k и приравнивая нулю получающуюся производную, получим условие оптимизации для трансформатора потока:

$$L_2 = L_1\,, \qquad (28)$$

при этом поток в кольце сквида будет равен

$$\Delta\Phi_s = \frac{k}{2}\left(\frac{L_s}{L_1}\right)^{1/2} N_1 \Delta\Phi_1\,, \qquad (29)$$

а магнитные индукции соответствующих полей будут удовлетворять соотношению

$$\Delta B_s = \frac{k}{2}\frac{A_1}{A_2}\left(\frac{L_s}{L_1}\right)^{1/2} N_1 \Delta B_1\,, \qquad (30)$$

где A_1 – эффективная площадь катушки 1, т.е. произведение числа витков на площадь одного витка, A_2 – площадь сечения сигнальной катушки. Подставляя в (29) и (30) типичные значения параметров трансформатора потока: $L_s \simeq 10^{-9}$ Гн, $L_1 \simeq 10^{-7}$ Гн [одновитковая ($N = 1$) приемная катушка диаметром 2 см], $k = 0{,}6$, получим $\Delta\Phi_s = 0{,}03\Delta\Phi_1$ и $\Delta B_s \simeq$ $\simeq 12\Delta B_1$ (при $A_1/A_2 = 400$). Таким образом, передача *потока* в таком устройстве неэффективна: при изменении потока в приемной катушке на квант поток в кольце сквида изменится на 0,03 кванта. В то же время *магнитная индукция* усиливается трансформатором потока, и это усиление могло бы быть очень большим, если бы не следующие проблемы. Во-первых, это проблема согласования индуктивностей приемной и сигнальной катушек [условие (28)], возникающая при увеличении площади сечения (и, следовательно, индуктивности) приемной катушки; во-вторых, проблема обеспечения приемлемого коэффициента связи сигнальной катушки со сквидом при увеличении индуктивности сигнальной катушки. Для решения первой проблемы между приемной и сигнальной катушками помещают сверхпроводящий согласующий трансформатор, который заодно помогает уменьшить высокочастотные помехи. В этом случае соотношение между изменениями магнитной индукции в сквиде и приемной катушке имеет вид

$$\Delta B_s = \frac{A_1}{2A_2}\left(\frac{L_s}{L_1}\right)^{1/2}\left[\frac{k_s k_t}{1 + (1 - k_t^2)^{1/2}}\right]\Delta B_1\,, \qquad (31)$$

где k_t – коэффициент трансформации согласующего трансформатора. Заметим, что в соотношение (31) входит только коэффициент k_t, но не индуктивность и число витков согласующего трансформатора. Такой трансформатор может обеспечить хорошее согласование между приемной катушкой большой индуктивности и очень маленькой сигнальной катушкой, если коэффициент k_t достаточно велик. Он редко превышает 0,8, а следовательно, $k_t/[1 + (1 - k_t^2)^{1/2}] = 0{,}5$, т.е. эффективность передачи индукции поля в сквид уменьшается в два раза. Однако выигрыш,

даваемый лучшим согласованием, и повышение уровня защиты от помех по высоким частотам заставляют мириться с этим.

2.6. Сверхпроводящие магнитные экраны

Магнитные экраны становятся очень важной частью рассматриваемых в этой главе магнитометров в тех случаях, когда предполагается использовать прибор на пороге его чувствительности. Ферромагнитные экраны обычно ослабляют внешнее поле не более чем в 10^4 раз, в то время как с помощью сверхпроводящих экранов легко достичь уровня экранирования порядка 10^8 и более, причем последний не зависит от частоты в диапазоне от долей герца до гигагерц (10^9 Гц).

Полностью замкнутая оболочка из сверхпроводящего материала захватывает поле, которое пронизывает ее в момент перехода в сверхпроводящее состояние, и осуществляет экранирование до тех пор, пока не достигнуто критическое значение поля. Если оболочка не замкнута, то поле может проникать внутрь, однако этот краевой эффект можно сделать очень малым, выбрав правильную конструкцию экрана.

Принцип действия сверхпроводящего экрана можно пояснить на примере кольца из сверхпроводящего материала, охлажденного ниже критической температуры в отсутствие магнитного поля. Если вдоль оси кольца приложить однородное магнитное поле, то возникнет сверхпроводящий ток. Создаваемое им магнитное поле неоднородно и компенсирует внешнее поле так, что потоки этих полей через площадь кольца будут в точности равны.

На рис. 4.11 показаны распределения компонент магнитного поля вокруг сверхпроводящей трубки в той же ситуации, которая только что описана для кольца. Поле, индуцированное сверхпроводящим током, здесь значительно более однородно, но возникают качественно те же эффекты. В левой части сечения трубки указана разность между аксиальными компонентами внешнего и индуцированного полей. Видно, что у края остаточное поле внутри экрана больше, чем в центральной области. На оси z компонента остаточного поля совпадает по направлению с внешним полем, а ближе к стенке трубки направлена ему навстречу. У краев трубки неоднородность индуцированного поля максимальна.

Изменение поля внутри цилиндрического экрана описывается формулами

$$B_{lz} = B_l \exp(-3{,}5z/r) \simeq B_l (1/31)^{z/r},$$
$$B_{tz} = B_t \exp(-1{,}75z/r) \simeq B_t (1/36)^{z/r},$$

где B_{lz} и B_{tz} – продольная и поперечная компоненты поля в точке, лежащей на оси трубки на расстоянии z от ее среза, B_l и B_t – продольная и поперечная компоненты внешнего поля, r – внутренний радиус цилиндра. Например, на расстоянии $4r$ по оси от среза цилиндра продольная компонента поля будет ослаблена в $31^4 = 9{,}2 \cdot 10^5$ раз, а попереч-

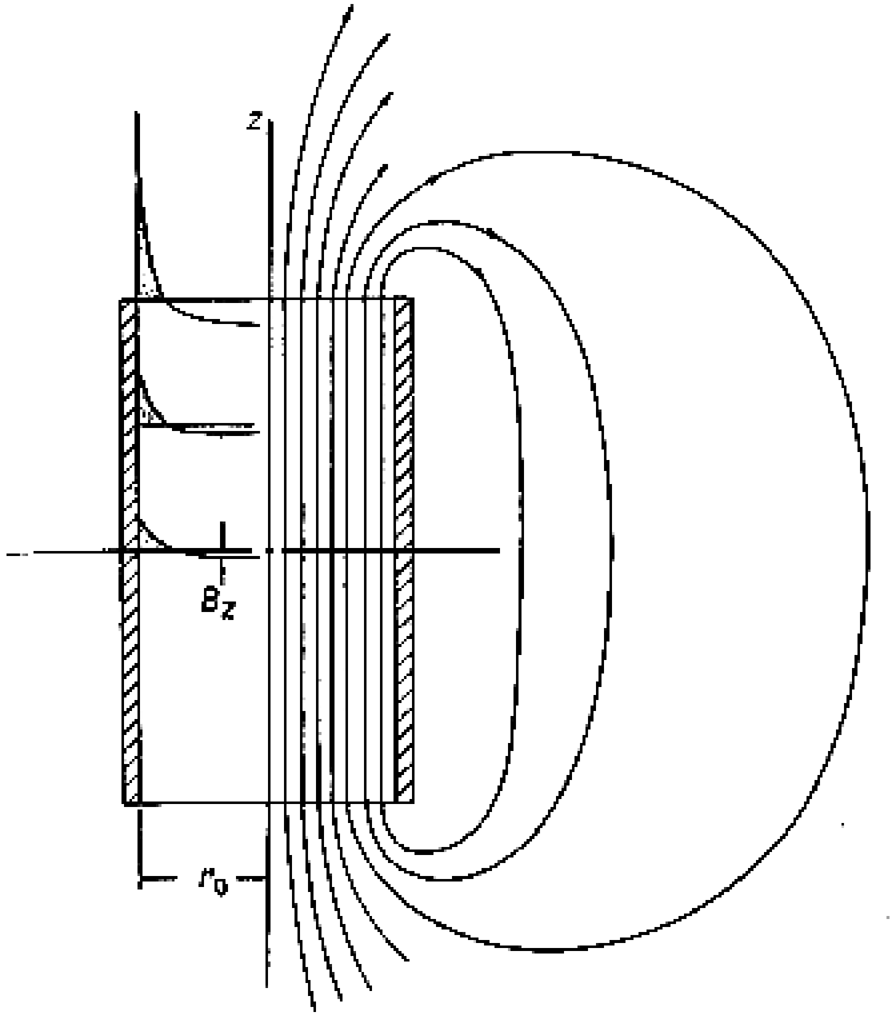


Рис. 4.11. Сверхпроводящий экран. Внешнее поле направлено навстречу оси z. Справа показаны силовые линии индуцированного поля, а слева распределение разностного поля (разность внешнего и индуцированного полей) внутри экрана.

ная – в $36^2 = 1{,}3 \cdot 10^3$ раз. В такой же степени ослабляются и изменения поля.

Способность сверхпроводящего экрана, в котором произошел переход в сверхпроводящее состояние, захватывать магнитное поле иногда используют для проведения измерений при фиксированных значениях поля. Нужно отметить, что эффект Мейснера, на котором основано применение сверхпроводников для магнитного экранирования, т.е. выталкивание магнитного потока из сверхпроводника, составляет всего 10–20% для свинца и ниобия обычной чистоты (99,9–99,99%). Поскольку объем сверхпроводящего материала экрана очень мал по сравнению с объемом экранируемой полости, то изменение поля при его захвате может составлять менее 1%. После того как экран перешел в сверхпроводящее состояние, все другие способы поддержания и регулировки магнитного поля, такие как использование ферромагнитных экранов, катушек Гельмгольца или соленоидов, становятся излишними, а захваченное поле будет оставаться постоянным до тех пор, пока

сохраняется сверхпроводимость экрана. Описанный способ магнитного экранирования позволяет проводить очень чувствительные измерения в обычных лабораторных условиях.

3. Криогенное обеспечение

Все известные в настоящее время сверхпроводящие материалы, из которых могут быть изготовлены сквиды и трансформаторы потока имеют критическую температуру около 10 К[1]. Со временем будут разработаны микрорефрижераторы, которые избавят исследователей от неудобств, связанных с использованием хладагентов. Однако в настоящее время для охлаждения сверхпроводящих частей сквид-магнитометра приходится использовать жидкий гелий. Из-за очень низкой теплоты испарения жидкого гелия (для испарения 1 л жидкого гелия в сутки требуется мощность всего 28 мВт) гелиевый дьюар должен обеспечивать достаточно эффективную теплоизоляцию хладагента, а части прибора помещенные в жидкий гелий, не должны выделять слишком много тепла. Необходимо минимизировать и количество тепла, поступающего по проводам и деталям конструкций.

На рис. 4.12 схематически изображен вертикальный дьюар, обычно используемый в сквид-системах. Эффективность такого дьюара определяется подводом тепла к объему, содержащему гелий. Поток подводимого тепла состоит главным образом из двух компонент: потока по трубе, на которой висит сосуд для гелия, и потока через вакуумное пространство. В поток по трубе вносят вклад тепловое излучение тепловой поток по стенкам трубы и по газообразному гелию, заполняющему трубу, включая конвекционную теплопередачу, а также поток тепла по проводам и тепловым экранам, опирающимся на ту же трубу Теплопередача через вакуумное пространство, окружающее гелиевый объем, осуществляется как за счет излучения между слоями термоизоляции, так и за счет прямой передачи тепла в точках соприкосновения слоев с разной температурой. Существенный подвод тепла может возникать за счет наличия остаточного газообразного гелия в вакуумном пространстве. Для уменьшения этого компонента используют специальную глубокую откачку крионасосом. Проблемы, связанные с диффузией гелия в вакуумное пространство дьюара, более подробно обсуждаются ниже.

Большие технические возможности заложены в использовании значительной теплоемкости газообразного гелия, испаряющегося с поверхности жидкого гелия. Удельная теплота нагревания газообразного гелия от 4,2 К до комнатной температуры примерно в 75 раз превосходит теплоту испарения (Long, Loveday, 1968, p. 284). В этом разделе

[1] Недавно были открыты сверхпроводящие керамики с критическими температурами, превосходящими 100 К.– *Прим. перев.*

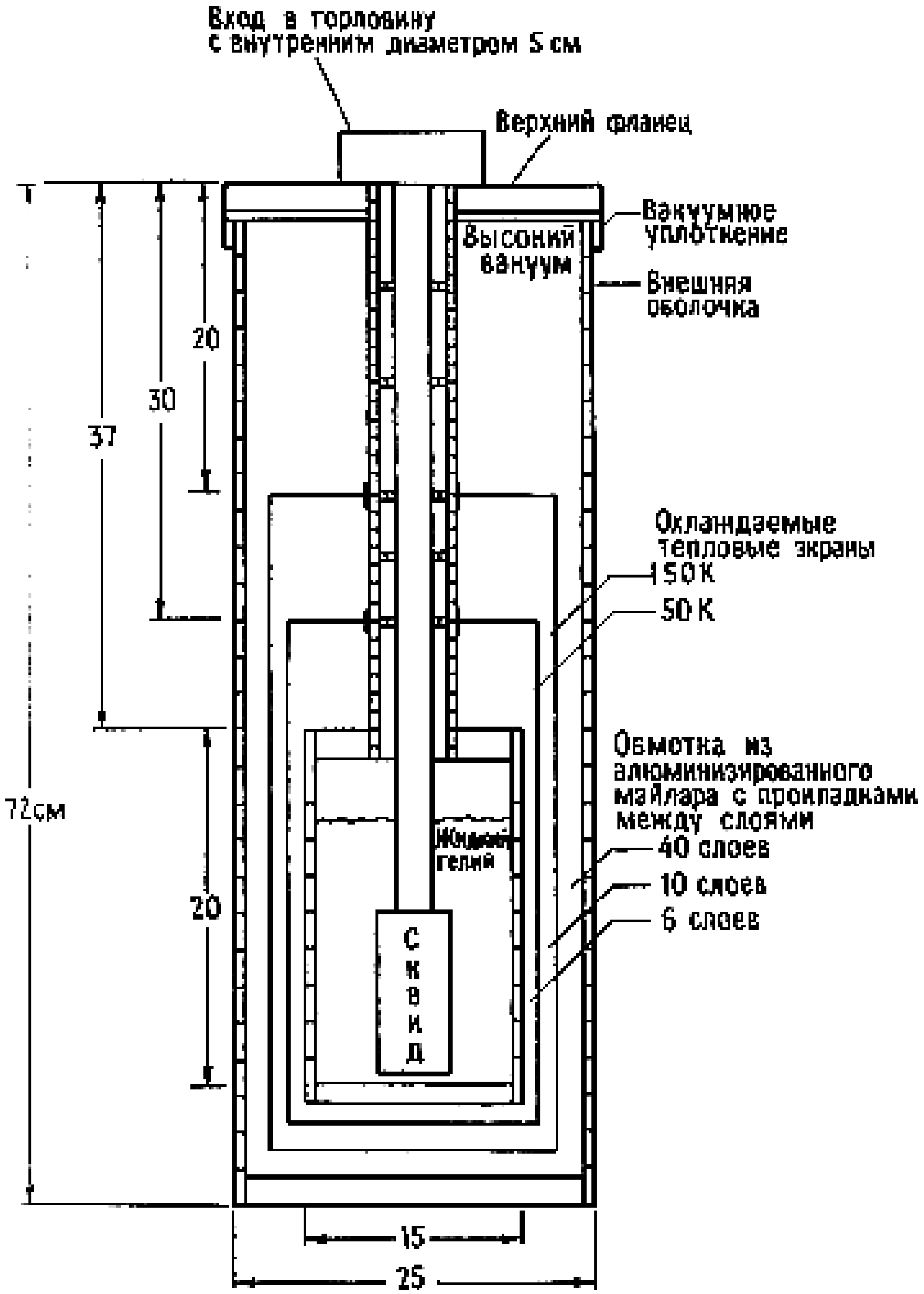


Рис. 4.12. Устройство дьюара с вертикальным рабочим каналом и суперизоляцией.

описано несколько способов использования холодного газообразного гелия для уменьшения подвода тепла к объему с жидким гелием.

Ниже мы дадим обзор технических требований и приемов, использующихся при конструировании коммерческих сквид-систем.

3.1. Теплопередача путем теплопроводности

Самую существенную компоненту потока тепла, обусловленную наличием газа между стенками дьюара, можно сравнительно легко уменьшить, откачав этот объем. Очень эффективна криогенная откачка с

помощью какого-либо адсорбента (скажем, активированного угля), контактирующего с поверхностью, находящейся при температуре жидкого гелия. Это позволяет снизить давление на несколько порядков и поддерживать его на достаточно низком уровне даже при наличии небольших течей. Давление между стенками дьюара при комнатной температуре не должно превышать 10 мкм ртутного столба.

Поток тепла $\dot{Q}$, обусловленный теплопроводностью, как известно, определяется формулой

$$\dot{Q} = k(A/l)\Delta T,$$

где k – коэффициент теплопроводности, A – площадь поверхности, через которую происходит теплопередача, l – расстояние между поверхностями, ограничивающими область теплопередачи, ΔT – разность температур этих поверхностей. Коэффициент теплопроводности k зависит от температуры таким образом, что охлаждение испаряющимся газом электрических проводов, идущих к объему с жидким гелием, может существенно изменить распределение температуры и уменьшить количество тепла, поступающего к жидкому гелию. Это уменьшение обычно составляет от 0,5 до 0,99 исходного количества поступающего тепла (Scott, 1959). Для изготовления дьюаров чаще используют сплавы, поскольку они обладают меньшей теплопроводностью, чем чистые металлы. Обычно применяют трубы и проволоку из сплавов кремний – медь, бериллий – медь, никель – медь или из нержавеющей стали. Данные по теплопроводности многих материалов можно найти в работах справочного характера (Gibbons, 1971, р. 678; Powell, Blanpied, 1954). При изготовлении сквид-систем, в которых необходимо применять только немагнитные и даже неметаллические конструкции, используют различные композитные материалы на основе эпоксидных смол с тканевыми наполнителями из стекла, кварца и кевлара.

3.2. Теплопередача путем излучения

Примерно половина количества тепла поступает в дьюар с жидким гелием путем излучения, которое осуществляется через вакуум между стенками дьюара, через отверстия труб, предназначенных для подвески объема с жидким гелием, для заливки жидкого и выхода газообразного гелия, и через другие отверстия. Плотность потока тепла $\dot{Q}_r$, переносимого путем излучения через вакуумное пространство, в котором расположено n отражающих слоев, задается соотношением (Scott et al., 1968, р. 168)

$$\dot{Q}_r = \varepsilon \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{2(n+1)}, \qquad (32)$$

где ε – излучательная способность отражающей поверхности (выбранная для простоты одинаковой для всех поверхностей), $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-12}$ Вт/(см$^2\cdot$К) – постоянная Стефана – Больцмана, T_1 - температура в области высоких температур ($\sim$ 290 К), T_2 – температура в низкотемпературной области ($\sim$ 4 К). Это соотношение выполняется строго только в отсутствие прямого контакта между отражающими слоями.

Для дьюара с несеребренными стенками, не имеющего радиационных экранов, $\dot{Q}_r \simeq 0{,}02$ Вт/см^2. Введение одного слоя алюминизированного майлара с $\varepsilon \simeq 0{,}02$ в качестве экрана уменьшает $\dot{Q}_r$ в 200 раз до уровня 10^{-4} Вт/см^2. Использование экрана из n слоев снижает теплопередачу в $\approx 2(n+1)$ раз. На практике пространство, которое может быть заполнено слоями отражающего материала, обычно весьма ограничено из-за необходимости уменьшения размеров и массы дьюара, так что слои приходится разделять только тонкой прослойкой специальной стеклоткани, пренебрегая тем самым условием отсутствия теплового контакта между ними. При увеличении числа слоев в такой суперизоляции приток тепла за счет теплопроводности растет, а теплопередача путем излучения падает. Оптимальная плотность слоев в суперизоляции зависит от материала прослойки, характера расположения слоев отражающего материала, температуры каждого из слоев и давления остаточного газа, обычно имеющегося в вакуумном пространстве дьюара. Как правило, при комнатной температуре на 1 см в радиальном направлении приходится 50 слоев, а при температуре жидкого гелия – 10 слоев. Более подробные сведения о многослойной вакуумной теплоизоляции содержатся в соответствующих обзорах (Scott et al., 1968, р. 170; Molnar, 1971).

3.3. Экраны, охлаждаемые испаряющимися хладагентами

Для дальнейшего улучшения теплоизоляции можно добавить к многослойной изоляции из отражающих слоев экраны, находящиеся в хорошем тепловом контакте с испаряющимся гелием. Такая комбинация высокого вакуума, многих отражающих слоев и охлаждаемых экранов называется суперизоляцией. Примерные размеры «типичного» дьюара для сквид-систем и расположение тепловых экранов показаны на рис. 4.12. В качестве отражающих слоев обычно используют пленку из алюминизированного майлара толщиной 50 мкм. Охлаждаемые экраны изготавливают из медной или алюминиевой фольги толщиной 0,1 мм; они полностью охватывают сосуд с жидким гелием, располагаясь между отражающими слоями. Чтобы обеспечить контакт с испаряющимся гелием, экраны припаивают или приклеивают эпоксидной смолой к горловине. В дьюаре описанной конструкции с двумя экранами можно достичь плотности потока тепла 1–5 мкВт на 1 см^2 наружной поверхности дьюара, что соответствует для пятилитрового дьюара, изображенного на рис. 4.12, суммарному теплопритоку к жидкому гелию около 20 мВт; это приводит к расходу гелия, равному 0,8 л в сутки. Около половины этого количества гелия расходуется из-за подвода тепла по горловине за счет теплопроводности, конвекции и излучения.

3.4. Конструкция дьюаров

Дьюары для сквид-систем должны быть достаточно прочными и в то же время легкими; кроме того, к ним предъявляются строгие требования с точки зрения минимального и правильного использования магнитных и металлических деталей. Эти требования становятся еще более критичными, когда дело касается конструкций, находящихся вблизи приемных катушек магнитометра. В криогенных системах сквидов чаще всего используют неметаллические композиционные материалы из стеклянной, кварцевой или кевларовой ткани, пропитанной эпоксидной смолой. Но поскольку стеклопластик (композиционный материал из стеклоткани и эпоксидной смолы) парамагнитен, его не следует применять для изготовления каркасов измерительных катушек и сосудов для гелия. Иногда наружную оболочку дьюара и внутренний сосуд изготавливают, наматывая на болванку нить из стекла или синтетического волокна с одновременной пропиткой эпоксидной смолой. Более удобен и общепринят метод склейки дьюаров из стеклопластиковых пластин и труб с помощью эпоксидной смолы. Металлические детали делают из алюминиевых сплавов (6061), нержавеющей стали (321) и сплавов меди с никелем, бериллием или кремнием. Из этих материалов нержавеющая сталь обладает наименьшей теплопроводностью, но наибольшей остаточной намагниченностью. Поскольку эта сталь обладает также способностью сильно намагничиваться при сварке и пайке серебром, не рекомендуется помещать детали из нее в чувствительной зоне магнитометра вблизи сквида. Нержавеющую сталь часто используют для изготовления горловины дьюара, поскольку при этом существенно уменьшается поступление тепла и снимается проблема диффузии гелия в вакуумное пространство дьюара. Сплавы кремний–медь применяют при конструировании высокочастотных экранов и изготовлении сосудов для гелия там, где можно использовать зависимость электропроводности этих сплавов от состава.

Дьюары, предназначенные для работы со сквид-системами, должны удовлетворять многим специальным требованиям, чтобы вносимые ими помехи были минимальны. Ниже обсуждаются некоторые из этих требований, показывающие, как трудно проектировать такие системы.

Во-первых, по возможности нужно устранить источники магнитных шумов. Вихревые токи, термо-ЭДС, тепловые шумовые токи – все это может приводить к появлению побочных магнитных полей на приемной катушке магнитометра. Вакуумная оболочка дьюара, суперизоляция и сосуд для гелия должны быть сконструированы так, чтобы подавить указанные эффекты.

Другим важным фактором, обеспечивающим надежную работу сквид-системы, является правильное экранирование от высокочастотных помех. Для этого обычно между приемной катушкой и сквидом помещают специальный трансформатор и/или устанавливают высокочастотный металлический экран, закрывающий всю приемную часть прибора. Применение трансформатора наиболее эффективно, но при этом коэффициент связи внешнего поля со сквидом, а следовательно, и предельная чувствительность прибора уменьшаются в 2–3 раза. Достаточно эффективными могут быть и металлические экраны. Например, если изготовить сосуд для гелия и горловину из металла, то было бы обеспечено прекрасное экранирование, но в такой конструкции могут возникать сильные вихревые и тепловые токи. При соблюдении необходимых мер предосторожности подобная техника экранирования может все же дать удовлетворительные результаты, особенно когда она применяется в стационарных магнитометрах, но для использования в градиентометрах она непригодна. В дьюарах с высокочастотными экранами все электровводы должны быть снабжены высокочастотными фильтрами, иначе помехи, подводимые по проводам, идущим внутрь дьюара, сведут на нет действие экранов.

Поскольку характеристики сквида и намагниченность различных деталей сквид-магнитометра зависят от температуры, очень важным становится вопрос о термостабилизации системы. Температура сквида определяется прежде всего давлением паров над ванной с жидким гелием (White, 1979, p. 307). В связи с этим дьюары, предназначенные для работы в полевых условиях, необходимо оборудовать клапанами, которые облегчали бы стабилизацию температуры, а также предотвращали образование пробок в горловине и возникновение других отрицательных эффектов, описанных ниже. Наиболее распространенный так называемый клапан абсолютного давления (фирма Tavco, Inc., Scott et al., 1968, p. 203) поддерживает давление на уровне атмосферного с точностью $\pm$ 0,03 атм, что соответствует диапазону изменения температуры ванны с жидким гелием $\pm$ 40 мК вблизи 4,2 К. Случайные изменения температуры могут приводить к появлению помех как из-за непосредственного влияния на характеристики самого сквида, так и вследствие парамагнетизма материалов, из которых выполнены сосуд для гелия, каркас приемных катушек и т. п. Эксперименты показали, что изменение магнитного потока в ПТ-сквиде, вызванное изменениями температуры, составляет от $5 \cdot 10^{-3}\Phi_0$/К до $0{,}3\Phi_0$/К (Clarke et al., 1975). Этот результат авторы объясняют зависимостью от температуры критического тока и парамагнитных свойств материала сквида, а также связанными с перепадами температуры флуктуациями магнитного потока. Для «типичных» сквид-магнитометров изменение магнитного потока в приемной катушке на один квант (Φ_0) соответствует изменению поля примерно на 10^{-6} Гс. Следовательно, нестабильность температуры жидкого гелия в диапазоне $\pm$ 40 мК, допускаемая стандартным клапаном абсолютного давления, будет порождать сигнал, соответствующий полю $\pm 10^{-8}$ Гс. Сходные температурные характеристики, зависящие от вида контакта, настройки и особенностей конструкции датчиков, имеют и ВЧ-сквиды.

С помощью специальных регуляторов флуктуации температуры могут быть уменьшены в 1 000 раз. Один из регуляторов, сконструированный для переносной сквид-системы, описан в работе Gamble et al., 1978.

Шумы могут возникать и из-за изменений с температурой свойств конструкций из диа- и парамагнетиков, расположенных вблизи сквида и приемных катушек. Температурная зависимость магнитной восприимчивости χ парамагнетика, как известно, задается соотношением

$$\chi = \chi_0 + C/T,$$

где χ_0 – не зависящая от температуры составляющая, C – константа Кюри, T – абсолютная температура. Следовательно,

$$d\chi/dT = -C/T^2,$$

а изменение магнитного момента парамагнетика dm, вызванное изменением температуры dT, составляет

$$dm = -(CM/T^2)\,H\,dT,$$

где M – масса парамагнитного образца, H – внешнее магнитное поле. Сведения о магнитной восприимчивости конструкционных материалов, используемых в криогенике, содержатся в многочисленных публикациях справочного характера (Salinger, Wheatley, 1961; Ginsberg, 1970; Prober, 1975).

Таким образом, флуктуации температуры в сквид-системе могут приводить к существенным магнитным помехам. К счастью, характерные частоты таких флуктуаций благодаря работе регулятора давления весьма низки (порядка 0,1 Гц) и могут лежать вне диапазона исследуемых частот. Далее, из-за малой теплопроводности жидкого гелия распределение температуры в этой жидкости весьма неоднородно, так что почти половина флуктуационного изменения температуры может приходиться на тонкий слой вблизи поверхности. Особенно четко такой эффект наблюдается в отсутствие механических возмущений жидкости и при повышенном давлении паров.

Сверхпроводящие материалы представляют собой идеальные диамагнетики, и поэтому внутри деталей из сверхпроводников, таких как оболочка сквида и экранирующие трубы, исключены всякие изменения магнитного потока. Жидкий гелий тоже диамагнитен, но имеет значительно меньшую объемную восприимчивость ($-8\cdot10^{-7}$), чем сверхпроводники (-1). Поскольку свойства диамагнетиков не изменяются при низких температурах, связанные с ними помехи в работе сквид-магнитометра могут возникать только в результате искажений поля из-за наличия и перемещения диамагнитных объектов вблизи приемной катушки или самого сквида. Например, если сквид расположен слишком близко к ортогональным приемным катушкам, то эта ортогональность может нарушаться при переходе системы в сверхпроводящее состояние. Магнитная индукция, возникающая за счет загрязнения жидкого гелия, равна 10^{-13}–10^{-12} Тл и ее можно уменьшить, сделав в резервуаре для гелия специальные перегородки и отделив приемные катушки от жидкого гелия.

3.5. Диффузия газообразного гелия

Газообразный гелий сравнительно легко диффундирует в большинстве неметаллических материалов, например в стекле и стеклопластике. Но поскольку при температуре жидкого гелия скорость диффузии пренебрежимо мала, можно говорить только о диффузии в верхней части горловины, имеющей комнатную температуру. Именно в этой части дьюара происходит натекание гелия в вакуумное пространство. Из количественных характеристик этого процесса известны скорости диффузии в различных сортах стекла (White, 1979, p. 38), что же касается стеклопластиков, то точные данные здесь отсутствуют[1]. Проблему диффузии можно частично решить, поместив в вакуумное пространство дьюара на резервуаре с жидким гелием адсорбент, например активированный уголь (Molnar, 1971, p. 222). Он может адсорбировать большое количество газообразного гелия, поддерживая высокий вакуум. Адсорбирующий материал объемом 5–10 см^3 способен «справляться» с диффузией в течение нескольких месяцев. Поскольку материалы, используемые в качестве адсорбента, часто бывают магнитны, его рекомендуется размещать как можно дальше от приемных катушек. При отогреве дьюара адсорбент высвобождает связанный с ним гелий в вакуумное пространство; количество диффундирующего гелия и скорость диффузии быстро растут по мере приближения температуры стеклопластика к комнатной. Степень проникновения гелия в вакуумное пространство можно уменьшить, отогревая дьюар только до температуры жидкого азота или промывая гелиевый объем во время отогрева газообразным азотом. После отогрева вакуумное пространство следует откачать до давления, не превышающего нескольких миллиторр, и затем продолжить откачку при этом уровне вакуума в течение нескольких часов, с тем чтобы удалить бóльшую часть газообразного гелия. Для более полного удаления остатков гелия имеет смысл заполнить вакуумное пространство газообразным азотом, а затем откачать его. Все эти манипуляции должны выполняться с достаточной осторожностью, чтобы не вызвать схлопывания слоев суперизоляции.

3.6. Хранение и переливание жидкого гелия

Для хранения и транспортировки жидкого гелия лучше всего использовать специальные транспортные дьюары с суперизоляцией (например, изготавливаемые фирмами Linde, Airco, M. V. E., Cryolab). Имеется широкий выбор легких и высокоэффективных конструкций из алюминия и/или нержавеющей стали объемом от 30 до нескольких сотен литров. Такие дьюары часто бывают снабжены клапаном абсолютного

[1] Такие данные имеются в следующей работе: Натрусов В. И., Тесля Л. М., Каганер М. Г., Урлик Г. Г. Газопроницаемость эпоксидных стеклопластиков. Физико-химическая механика материалов, 1982, т. 18, № 6, с. 112. – *Прим. перев.*

давления и аварийным клапаном, необходимым при транспортировке самолетом.

Переливать жидкий гелий и работать с ним в полевых условиях несколько сложнее, чем в лаборатории. Следует иметь в виду, что транспортный дьюар и дьюар с прибором могут находиться при разных давлениях и, кроме того, эти давления могут быть отличны от атмосферного. В этом разделе мы рассмотрим источники потерь гелия, возникающих при подготовке и проведении охлаждения дьюара, его заполнении и доливе. Все эти вопросы прекрасно освещены в работе Scott et al., 1968, p. 193–227.

Стандартная процедура подготовки дьюара к заливке жидким гелием заключается в его предварительном охлаждении с помощью жидкого азота, который сравнительно недорог, имеет высокую теплоемкость и прост в обращении. Однако использование еще одного хладагента связано с дополнительными хлопотами, особенно при работе в полевых условиях. Есть и еще один недостаток: перед началом заливки необходимо полностью удалить азот из дьюара. Это очень важно, поскольку жидкий (или твердый) азот плохо проводит тепло (коэффициент теплопроводности $\sim 10^{-4}$ Вт/(см·К) и обладает большой теплоемкостью при температурах между 77 и 4,2 К, так что для охлаждения одного литра азота до 4,2 К могут потребоваться десятки литров жидкого гелия. Заливать жидкий гелий без предварительного охлаждения жидким азотом имеет смысл, когда есть возможность эффективно охладить испаряющимся гелием внутренность дьюара, т. е. гелиевый резервуар и тепловые экраны. При такой процедуре заливки, часто занимающей много времени (2–10 ч), необходима хорошо теплоизолированная переливная трубка. Наш опыт показывает, что при охлаждении гелиевого резервуара до 4,2 К, а тепловых экранов до 80 К расходуется примерно по 2 л в 1 ч, после чего заливка жидкости происходит со скоростью 50 л в 1 ч. Сразу после заливки скорость испарения примерно втрое выше, чем в равновесном состоянии, т. е. через 12–24 ч.

Чтобы уменьшить расход гелия при переливании, нужно соблюдать некоторые предосторожности. Потери гелия происходят: 1) в ходе предварительного охлаждения переливной трубки; 2) из-за потерь тепла в этой трубке; 3) вследствие уменьшения и увеличения давления в дьюарах; 4) при дросселировании.

Переливная трубка должна быть легкой, компактной и достаточно гибкой, чтобы не затруднять небольшие перемещения соединяемых ею дьюаров. Чаще всего используются переливные трубки из нержавеющей стали с внутренним диаметром от 3 до 6 мм, вакуумно изолированные по всей длине. В некоторых конструкциях применяется дополнительная теплоизоляция с помощью нескольких слоев алюминизированного майлара, намотанных на внутреннюю трубку. Подвод тепла к жидкому хладагенту по переливной трубке обычно составляет от 1 до 3 Вт на 1 м длины трубки, причем у трубки с байонетным разъемом или с клапаном для регулировки расхода эта величина примерно в два раза больше. Для охлаждения переливной трубки до 4,2 К требуется менее 1 л жидкого гелия, поскольку при этой процедуре оптимально используется газообразный гелий.

Увеличение расхода гелия при изменении давления в дьюаре представляется довольно сложным процессом из-за теплового расслоения в жидком гелии (Scott et al., 1968, p. 223). Такие потери гелия возникают, когда перед заливкой необходимо выровнять давление (обычно на уровне атмосферного) в транспортном дьюаре и дьюаре, в который переливают гелий. Указанная необходимость часто возникает при работе с дьюарами, предназначенными для полевых условий. Уровень срабатывания клапана абсолютного давления в подобных дьюарах устанавливают на 0,05 атм выше нормального атмосферного давления (на уровне моря). Если же переливание осуществляют на значительной высоте, то может понадобиться снизить давление в дьюарах до давления в данной местности. Опыт показывает, что при уменьшении давления на $1{,}4 \cdot 10^4$ Па расходуется 5% переливаемого гелия, а на $2{,}8 \cdot 10^4$ Па – 10%.

Гелий расходуется и тогда, когда к дьюару, из которого переливают жидкость, подводят тепло (либо подавая теплый газ, либо другим способом) для повышения давления и нагнетания жидкости в переливную трубку (Scott et al., 1968, p. 227). При очень быстрой заливке (несколько минут) дополнительный расход гелия составляет несколько процентов объема переливаемой жидкости. Если давление поднимается медленно и заливка продолжается дольше, то теплообмен между сжатым газом и жидкостью повышается и испарение становится более интенсивным. Сжатый газ можно получить несколькими способами: стравливанием из баллона высокого давления, испарением с помощью нагревателя части жидкости в транспортном дьюаре или нагнетанием в него резиновой камерой теплого газа (White, 1979, p. 48). Последние два способа проще и поэтому их чаще используют в полевых условиях. Кроме того, при погружении переливной трубки в транспортный дьюар возникает избыточное давление, которого может быть достаточно для переливания 10–20 л жидкого газа. Расход гелия на увеличение давления примерно такой же, как и расход при его уменьшении – $5 \div 10\%$ от переливаемого количества.

Часть гелия расходуется в результате адиабатического дросселирования на выходном отверстии переливной трубки. Потери здесь примерно такие же, как и в процессах, обсуждавшихся выше, т. е. около 6% при перепаде давлений в $1{,}4 \cdot 10^4$ Па и 10% при перепаде $2{,}8 \cdot 10^4$ Па (Scott et al., 1968, p. 223).

Расходы, связанные с повышением давления и наличием переливной трубки, могут быть уменьшены путем увеличения скорости переливания. Напротив, затраты на дросселирование уменьшаются при более медленном переливании, т. е. при малом перепаде давления. Расход гелия при уменьшении давления также можно снизить, переливая гелий при несколько повышенном давлении, задаваемом регулировкой клапанов абсолютного давления на обоих дьюарах. По нашим данным, согла-

сующимся с результатами работ других авторов (Long, Loveday, 1968, p. 276), переливая гелий при перепаде в $(1,4-2,1)\cdot 10^4$ Па, можно добиться эффективности 85%, т.е. такую часть содержимого транспортного дьюара можно залить в дьюар с прибором.

К существенным потерям жидкого гелия могут приводить и термоакустические колебания столба газа в трубках, концы которых находятся при температуре жидкого гелия и при комнатной температуре (такие трубки используются в вибрационном измерителе уровня жидкого гелия) (Bannister, 1966, p. 127; Scott et al., 1968, p. 193). Подобные колебания могут возникать в любой трубке, открытый конец которой находится у поверхности жидкого гелия, а закрытый – при температуре, близкой к комнатной, и увеличивать количество поступающего по трубке тепла более чем в 100 раз. Термоакустические колебания можно предотвратить, просверлив в стенке трубки вблизи ее «теплого» конца небольшое отверстие. Этой же цели служат демпферные объемы, иногда располагаемые вне дьюара.

3.7. Меры предосторожности при работе с дьюарами

Жидкий гелий химически инертен и не взрывоопасен. Однако при переливании больших объемов гелия нужно позаботиться о достаточной вентиляции помещения, поскольку при случайном испарении больших количеств гелия последний может вытеснить весь воздух из помещения (Scott et al., 1968, p. 211).

Главную опасность при работе с дьюарами представляет образование пробок из твердого воздуха в трубках, идущих в резервуар с жидким гелием. Эта опасность становится еще более серьезной, если дьюар приходится транспортировать с изменением высоты над уровнем моря. Если в дьюаре с суперизоляцией выход газа заблокирован, то давление в нем будет быстро расти, поскольку из-за прекращения охлаждения тепловых экранов эффективность термоизоляции упадет по меньшей мере в 10 раз. Для транспортировки больших объемов жидких хладагентов часто используют герметичные контейнеры.

Показано, что в герметически закрытом дьюаре с азотным кожухом, первоначально заполненном на 90%, давление в первые 16 ч растет со скоростью примерно $3,5\cdot 10^3$ Па в час, а затем скорость возрастает до $2,0\cdot 10^4$ Па в час (Scott et al., 1968, p. 166).

В дьюарах с узкой горловиной пробка из твердого воздуха часто выдерживает большее давление, чем стенки резервуара. Однако достаточно прочные стенки могут выдерживать давление, соответствующее температуре 55 К – точке плавления твердого воздуха; в этом случае пробка расплавится и свободный выход газа из дьюара возобновится. При указанной температуре давление газа в резервуаре достигает 18 атм. Опасность, связанную с закупориванием дьюара, можно в значительной

мере уменьшить, снабдив его трубкой для аварийного сброса газа с клапаном высокого давления или клапаном абсолютного давления. Конструкция трубки должна быть такова, чтобы в ней не возникали термоакустические колебания.

3.8. Рефрижераторы

Устройство для поддержания рабочей температуры (в гелиевой области) прибора без использования жидкого хладагента представляется одним из необходимых компонентов оптимальной сквид-системы. В качестве такого устройства можно было бы использовать коммерческие гелиевые ожижители, если бы не ряд недостатков: высокая стоимость (50 тыс. долл. и более), превосходящая затраты на саму сквид-систему, большие размеры и, главное, огромные помехи (на много порядков превышающие уровень шумов сквида), которые из-за наличия движущихся намагниченных деталей такой механизм вносит в работу чувствительной магнитометрической установки.

Была сделана успешная попытка увеличить период автономной работы рок-магнитометра (см. разд. 4), в котором приемные катушки заключены в сверхпроводящий экран, снабдив его небольшим рефрижератором для охлаждения до 15 К теплового экрана, окружающего резервуар с жидким гелием. Такая система, созданная фирмой 2-G Enterprises, обеспечивает непрерывную работу магнитометра с гелиевым дьюаром объемом 100 л в течение более чем 500 сут.

Гораздо более серьезные требования к рефрижератору предъявляются в случае магнитометров и градиентометров, предназначенных для измерения сигналов от внешних источников. Такой рефрижератор должен иметь небольшие размеры, быть легким и создавать минимум магнитных, механических и тепловых шумов.

Для уменьшения помех, возникающих из-за вибраций, передаваемых магнитометру, можно использовать хорошую механическую развязку рефрижератора и сквид-магнитометра. Однако при этом необходим значительно меньший уровень остаточной намагниченности деталей рефрижератора, поскольку развязка приводит к увеличению свободы относительных перемещений указанных компонентов системы. Другой важной характеристикой, определяющей конструкцию рефрижератора для сквид-системы, является время получения рабочей температуры. Здесь также нужен некоторый компромисс между размерами и производительностью рефрижератора, с одной стороны, и предполагаемыми возможностями проектируемой системы – с другой. Идеальной можно считать конструкцию, которая позволила бы охлаждать прибор до рабочей температуры очень быстро, т.е. в течение нескольких минут. Тогда в качестве исходной температуры системы можно было бы принять комнатную температуру. В противном случае, т.е. если время охлаждения системы довольно велико, нужно иметь очень надежный рефрижератор и основываться на температуре, близкой к рабочей.

Обзор состояния разработок небольших рефрижераторов дан в работе Brandt et al., 1979.

4. Конструкции измерительных приборов

В этом разделе мы обсудим особенности конструкции следующих приборов.

1. Магнитометры и градиентометры для измерения магнитных полей образцов, расположенных вне дьюара.

2. Магнитометрические системы для проведения геофизических исследований образцов размерами до 5–10 см при комнатной температуре в полях, меньших 10^{-6} Тл, в объеме, экранированном сверхпроводящим экраном. Такие приборы иногда называют рок-магнитометрами (от англ. rock – скала).

3. Системы для измерения зависимостей от магнитного поля и температуры магнитной восприимчивости сравнительно небольших образцов (характерный размер < 10 мм) в полях до 5 Тл при температурах от 4 до 400 К.

4.1. Магнитометры

К настоящему времени разработано много типов сквид-магнитометров для применения в геофизике (магнитное и магнитотеллурическое зондирование), в медико-биологических исследованиях (получение магнитокардио- и магнитоэнцефалограмм), а также для физических исследований. Диаметр приемной катушки в таких приборах обычно лежит в диапазоне от 1 до 5 см. Предельная чувствительность магнитометра зависит от размеров этой катушки, от уровня шумов сквида и от коэффициента связи сквида с внешним магнитным полем. Пользуясь формулой (31), выразим минимальную разрешимую величину изменения внешнего поля ΔB_1 через уровень шумов сквида ΔB_s:

$$\Delta B_1 = \frac{2A_s}{N_1 k_2 A_1}\left(\frac{L_1}{L_s}\right)^{1/2}\Delta B_s. \qquad (33)$$

Иногда шумы сквида выражают через спектральную плотность магнитного потока $\Delta\Phi$ в индуктивности L_2 (см. рис. 4. 10), соответствующую шумам сквида. Эти величины связаны соотношениями

$$\Delta\Phi = \langle A_s \Delta B_s \rangle \qquad (34)$$

и, следовательно,

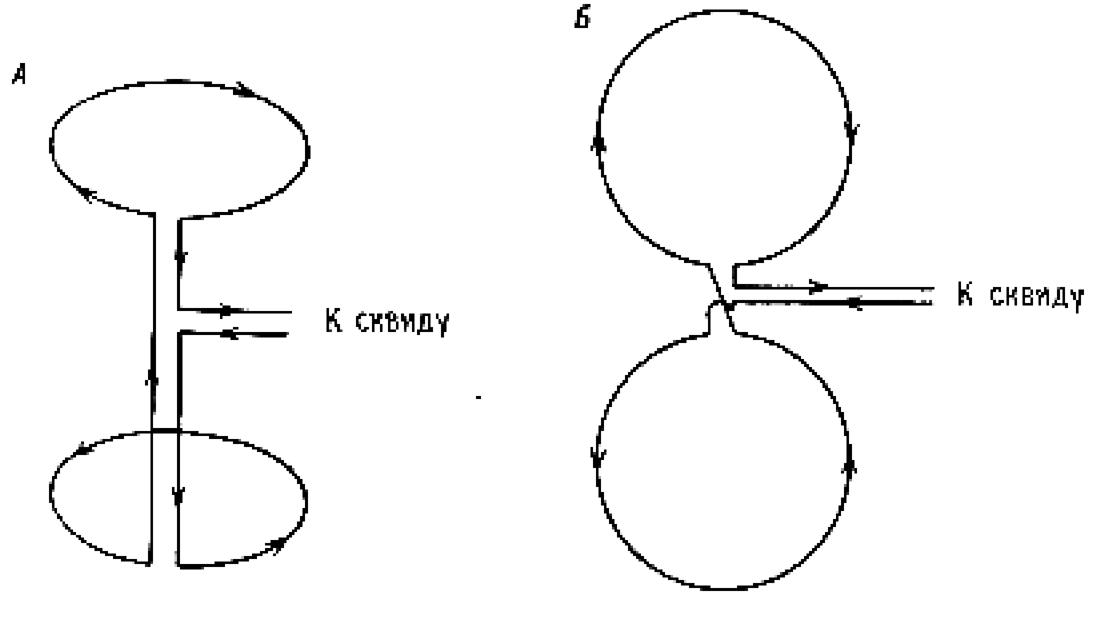
$$\Delta B_1 = \frac{2L_1^{1/2}}{N_1 A_1}\left(\frac{\Delta\Phi}{k_2^2 L_s}\right)^{1/2}.$$

Для серийно выпускаемых сквид-магнитометров $\Delta\Phi$ составляет $10^{-4}\Phi_0/\text{Гц}^{1/2}$–$10^{-5}\Phi_0/\text{Гц}^{1/2}$, и спектральная плотность шума не зависит от частот, превышающих 0,1–1 Гц, т.е. в этом диапазоне частот шум является «белым». Ниже указанных частот спектральная плотность шума становится обратно пропорциональной частоте, т.е. шум приобретает характер «$\frac{1}{f}$-шума». Если, как в примере из разд. 2.5, мы примем $L_s = 10^{-9}$ Гн, $L_1 = 10^{-7}$ Гн, $A_1 = 3\cdot 10^{-4}$ м^2 (диаметр катушки равен 0,02 м), $k_2 = 0{,}6$, $N_1 = 1$, а $\Delta\Phi = 5\cdot 10^{-5}\Phi_0/\text{Гц}^{1/2}$, то получим $\Delta B_1 \simeq$ $\simeq 10^{-12}$ Тл[1].

Магнитометр обычно регистрирует только одну из компонент вектора магнитного поля – перпендикулярную плоскости приемной катушки. Для полного измерения векторной величины поля необходимо использовать многоосную приемную систему, т.е. три катушки, ориентированные в трех взаимно перпендикулярных направлениях и подключенные каждая к своему сквиду. Такие многоосные магнитометры производят фирмы CTF Systems, 2-G Enterprises, S. H. E. Corporation и Cryogenic Consultants. Обычно в них используются дьюары на 10–30 л, которые могут обеспечить непрерывную работу прибора с промежутками между заливками гелия до двух недель. Уровень шумов таких магнитометров часто определяется вкладом от дьюара и несущих конструкций прибора, равным 10^{-13}–10^{-14} Тл.

4.2. Градиентометры

Градиентометрами называют приборы, снабженные приемной катушкой специальной конфигурации, позволяющей измерять разность магнитного поля в двух соседних областях пространства и таким образом



Приемные катушки диагонального градиентометра первого порядка ($\partial B_z/\partial z$) (А) и недиагонального градиентометра ($\partial B_x/\partial z$) (Б).

[1] Точнее, $\Delta B_1 \simeq 10^{-12}$ Тл/Гц$^{1/2}$. *Прим. перев.*

характеризовать градиент этого поля. На рис. 4.13 изображена геометрия приемных катушек градиентометров для измерения первой производной[1] в вертикальном направлении двух разных компонент поля: компоненты, лежащей в плоскости рисунка (рис. 4.13, *А*), и компоненты, перпендикулярной ей (рис. 4.13, *Б*). Тензор градиентов поля содержит девять компонент, но только пять из них независимы в силу следующих соотношений[2]:

$$\nabla B = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial y} = \frac{\partial B_y}{\partial x}, \quad \frac{\partial B_y}{\partial z} = \frac{\partial B_z}{\partial y}, \quad \frac{\partial B_z}{\partial x} = \frac{\partial B_x}{\partial z}.$$

С помощью приемных катушек соответствующей конфигурации можно измерить и производные более высоких порядков. На рис. 4.14 показано устройство катушек для измерения производной $\partial^2 B_z/\partial z^2$ [3]. Эти катушки представляют собой два градиентометра первого порядка, включенных последовательно и навстречу друг другу. В результате ток в такой цепи пропорционален *разности* градиентов магнитного поля, т. е. характеризует производную этого градиента.

Градиентометры измеряют градиенты поля, усредненные по пространству, в частности в направлении базы градиентометра, т. е. отрезка, соединяющего центры составляющих его катушек. Однако часто исследуемый образец, поле которого быстро спадает с расстоянием, располагают вблизи одной из этих катушек, и тогда сигнал с приемных катушек оказывается фактически пропорционален полю на образце. Катушки же градиентометра, находящиеся вдали от образца, используются в такой ситуации для компенсации более однородных по пространству сигналов, источниками которых, как правило, являются удаленные объекты. В измерениях такого рода градиентометр является инструментом устранения магнитных помех.

Поле магнитного диполя, находящегося в начале системы координат и направленного вдоль оси z (рис. 4.15), описывается соотношениями

$$H_r = 2M \cos\theta/4\pi r^3, \quad H_\theta = M \sin\theta/4\pi r^3,$$

где r и θ — сферические координаты точки, в которой измеряется поле. Градиент этих компонент поля, т. е. их производная по r, пропорционален $1/r^4$, а градиент второго порядка зависит от r как $1/r^5$ и т. д. Такая сильная зависимость поля магнитного диполя от расстояния означает,

[1] Такие градиентометры называются градиентометрами первого порядка.— *Прим. перев.*

[2] Первое соотношение является одним из уравнений Максвелла, а три других следует из тех же уравнений для областей пространства, в которых отсутствуют токи. *Прим. перев.*

[3] Осью z считается вертикальная ось, лежащая в плоскости рисунка. *Прим. перев.*

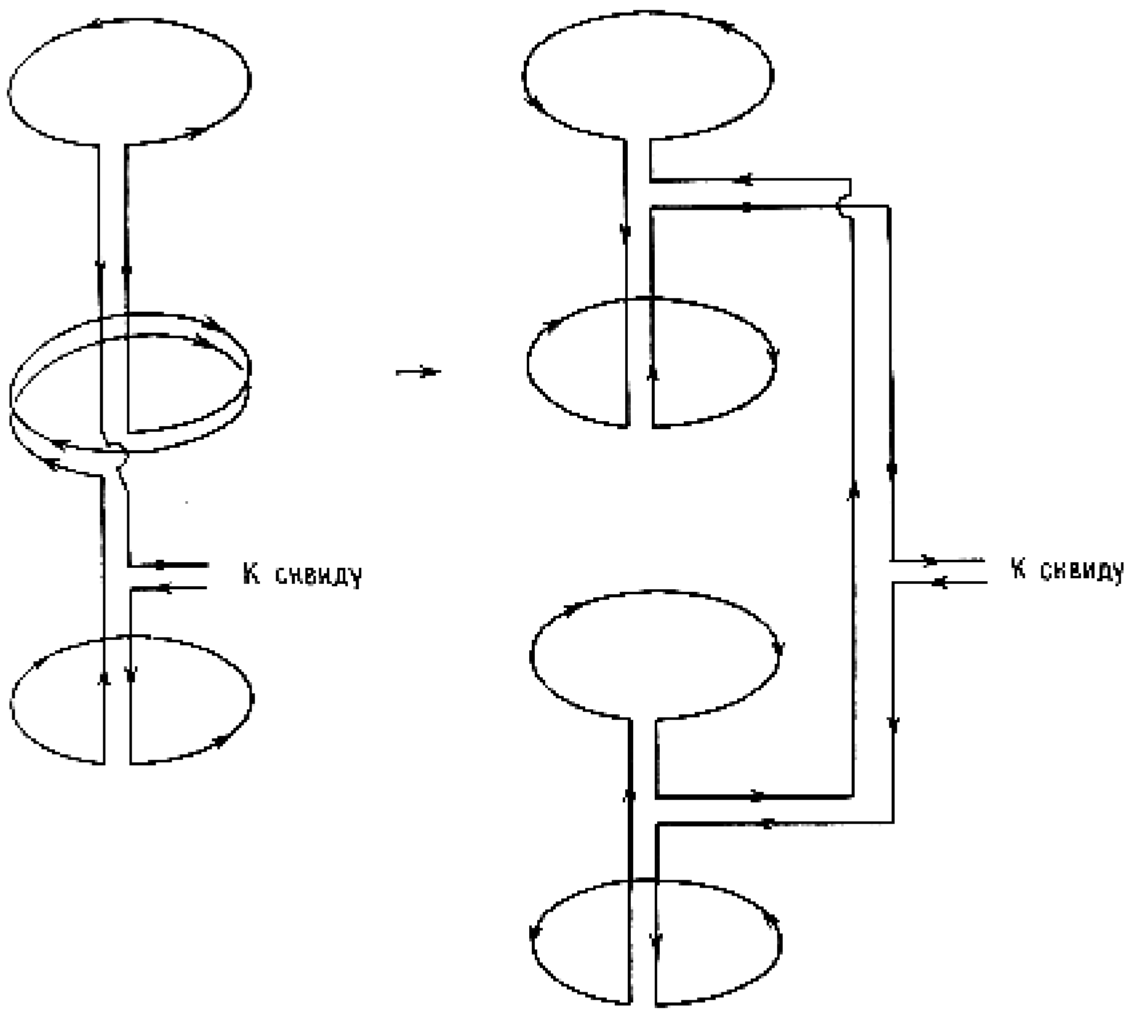


Рис. 4.14. Диагональный градиентометр второго порядка ($\partial^2 B_z/\partial z^2$).

что сигнал от удаленных дипольных источников, измеряемый градиентометрами первого и второго порядков, будет очень слабым, а когда диполь находится вблизи одной из приемных катушек градиентометра, то создаваемый им магнитный поток будет сцеплен в основном только с ближайшей катушкой. В этом случае, как уже указывалось, градиентометр измеряет поле в ближайшей окрестности диполя.

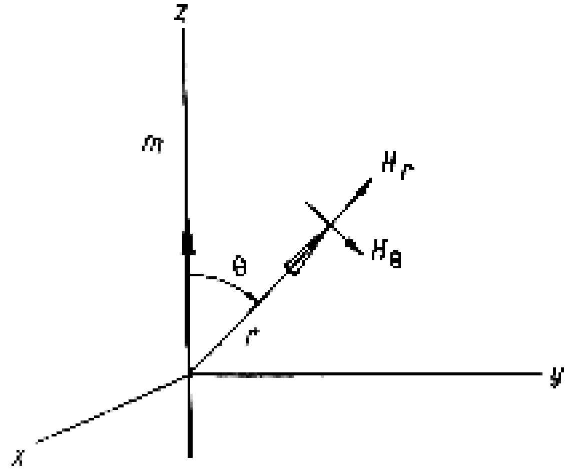


Рис. 4.15. Радиальная H_r и тангенциальная H_θ составляющие поля магнитного диполя m.

Для устранения помех, создаваемых удаленными источниками, градиентометр должен быть достаточно хорошо сбалансирован, т.е., например, градиентометр первого порядка не должен давать сигнала в переменном, но однородном в пространстве поле. Степень балансировки зависит в первую очередь от качества изготовления приемных катушек. Градиентометр, изображенный на рис. 4.13, *А*, может быть разбалансирован по двум причинам. Во-первых, площади верхнего и нижнего витков могут немного различаться (тогда сигнал будет возникать даже при нулевом градиенте поля); во-вторых, плоскости этих витков могут быть не совсем параллельны (тогда градиентометр будет чувствителен и к полю, перпендикулярному его базе).

Кроме точности выполнения геометрических соотношений, необходимых для балансировки, очень важна ее стабильность в отношении механических и тепловых воздействий. Для изготовления приемных катушек обычно применяют проволоку из сплава ниобий–титан, которую наматывают на кварцевый или кремниевый каркас, обработанный с высокой точностью (допуски около 0,01 мм). Отклонения плоскостей витков от параллельности не должны превышать 0,01°. Все это позволяет получить исходную балансировку порядка 10^{-3} на 1 м базы градиентометра. Уровень балансировки определяется как отношение сигнала градиентометра при наложении идеально однородного магнитного поля к сигналу от одной из составляющих его катушек. Этот уровень можно определить, поворачивая градиентометр (вместе с дьюаром) в магнитном поле Земли вдали от сильно намагниченных объектов. Отношение амплитуды сигнала, получающегося при этом и имеющего минимум и максимум, к соответствующей компоненте поля Земли и дает уровень балансировки.

Для повышения степени балансировки до 10^{-8}/м применяют подстроечные устройства или электронную компенсацию сигнала разбаланса. Подстройка производится с помощью небольших деталей из сверхпроводящего материала, передвигаемых вблизи одной из катушек градиентометра с целью получения нужной конфигурации поля. Эти детали либо размещают на каркасе градиентометра (и тогда требуется несколько раз отогревать прибор, чтобы добиться высокой степени балансировки), либо прикрепляют к штокам, выходящим через верхний фланец дьюара. Перемещая штоки с помощью микрометрических винтов, можно подстраивать балансировку градиентометра. Подстройкой балансировки градиентометра с помощью сверхпроводящих деталей обычно достигают уровня балансировки порядка 10^{-5}/м, а для дальнейшего его повышения используют электронную компенсацию (см., например, Vrba et al., 1982).

Фирмы CTF Systems, Cryogenic Consultants, 2-G Enterprises и S.H.E. Corporation производят приборы с приемными катушками самых разнообразных конфигураций, в том числе и предназначенных специально для магнитокардиографии и магнитоэнцефалографии, а также для исследования магнитных включений в различных образцах. Чувствительность системы обычно определяется уровнем магнитных шумов и деталями конструкции дьюара. В условиях со сравнительно низким уровнем шумов без экранирования удается достичь чувствительности градиентометра около $2\cdot10^{-13}$ Тл/м, достаточной для выявления очень слабых переменных полей в магнитоэнцефалографии. Для исследования магнитных включений в биологических образцах приходится регистрировать очень медленно меняющееся поле, поскольку исследуемое животное перемещают относительно датчика. Такие измерения целесообразнее всего производить в магнитоэкранированной камере, хотя ряд подобных работ был выполнен в условиях клиники с достаточно высоким уровнем шумов (разд. 5.1).

4.3. Магнитометры, использующиеся в геофизике, и приборы для измерения магнитной восприимчивости

Для магнитометров, использующихся в геофизике, приняты две основные конфигурации: система со сквозным рабочим каналом, вертикальным или горизонтальным, и система с вертикальным каналом, открытым только с одной стороны. Конструкция приборов для измерения магнитной восприимчивости аналогична конструкции вертикальных магнитометров, но включает еще и сверхпроводящий соленоид. Во всех этих приборах используются в принципе одинаковые ВЧ- и ПТ-сквиды и электроника с небольшими модификациями, облегчающими их применение в конкретных случаях. Показания магнитометра могут быть представлены в аналоговом и цифровом виде; их можно записать, например, на магнитную ленту и передать на компьютер по стандартному интерфейсу.

Три типа конструкций криогенной части систем, разработанные в Калифорнийском университете, используются и в серийном производстве приборов. Простейшая система имеет диаметр рабочего отверстия 3 мм (рис. 4.16, *А*). Измерительную вставку погружают прямо в жидкий гелий, находящийся в обычном дьюаре с суперизоляцией. Удобство такой конструкции состоит в том, что она обеспечивает легкий доступ к датчику и другим частям магнитометра. Однако она не лишена и недостатка, связанного с тем, что экран находится непосредственно в жидком гелии: из-за этого невозможно тепловое переключение экрана для захвата поля нужной величины без отогрева всей системы или подъема измерительной вставки из дьюара.

Описываемая система с вертикальным рабочим каналом, спроектированная специально для работы с очень маленькими образцами, имеет чувствительность по магнитному моменту $2\cdot10^{-13}$ А·м², что позволяет проводить измерения на отдельных псевдооднодоменных частицах. Поскольку пространство, в котором находится образец, можно вакуумировать, в процессе охлаждения вставки температура образца может изменяться от комнатной до температуры жидкого гелия. За температу-

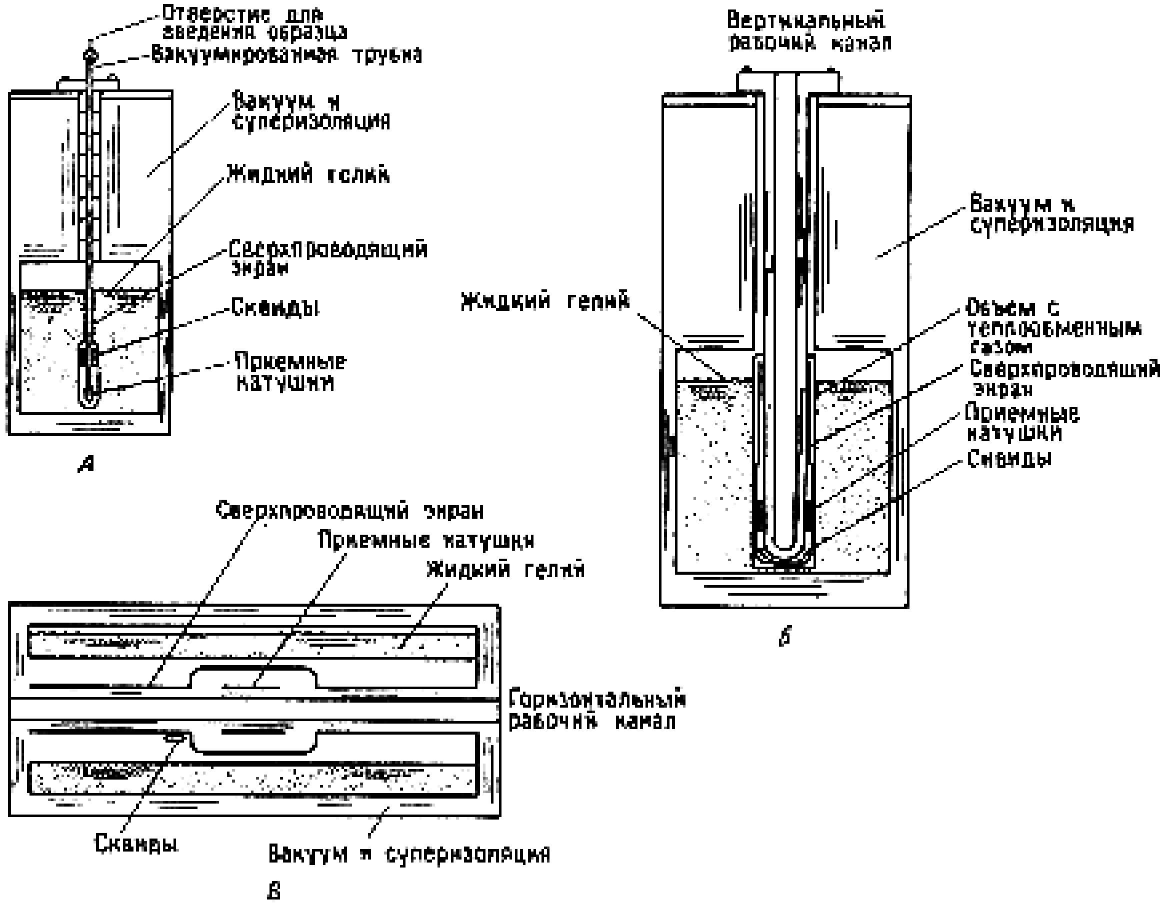


Рис. 4.16. Устройство сквид-систем различной геометрии. *А* – система с вертикальным рабочим каналом диаметром 3 мм, *Б* – система с вертикальным рабочим каналом и подогревом сверхпроводящего экрана, *В* – система с горизонтальным сквозным рабочим каналом.

рой образца при испытаниях системы следили, используя переход Морина[1] в гематите; было показано, что для измерений удобна скорость охлаждения около 0,5 К/мин. Конструкция приемных катушек магнитометра, имеющих продольную и поперечную ориентацию, позволяет измерять все три взаимно перпендикулярные компоненты намагниченности, поворачивая образец на 90° вокруг вертикальной оси.

Некоторые усовершенствования в описанную схему устройства магнитометра для геофизических измерений были внесены фирмой Superconducting Technology Inc. (рис. 4.16, *Б*). Они заключались в размещении сверхпроводящего экрана и датчиков в объеме, заполненном теплообменным газом (Не при давлении несколько микрометров ртутного столба), что позволяет контролировать тепловую связь между резервуаром с жидким гелием и измерительным блоком магнитометра и, в частности, нагревать экран выше критической температуры, не вынимая

[1] Магнитный фазовый переход Морина происходит в гематите при температуре 262 К и заключается в превращении слабоферромагнитной фазы в антиферромагнитную. – *Прим. перев.*

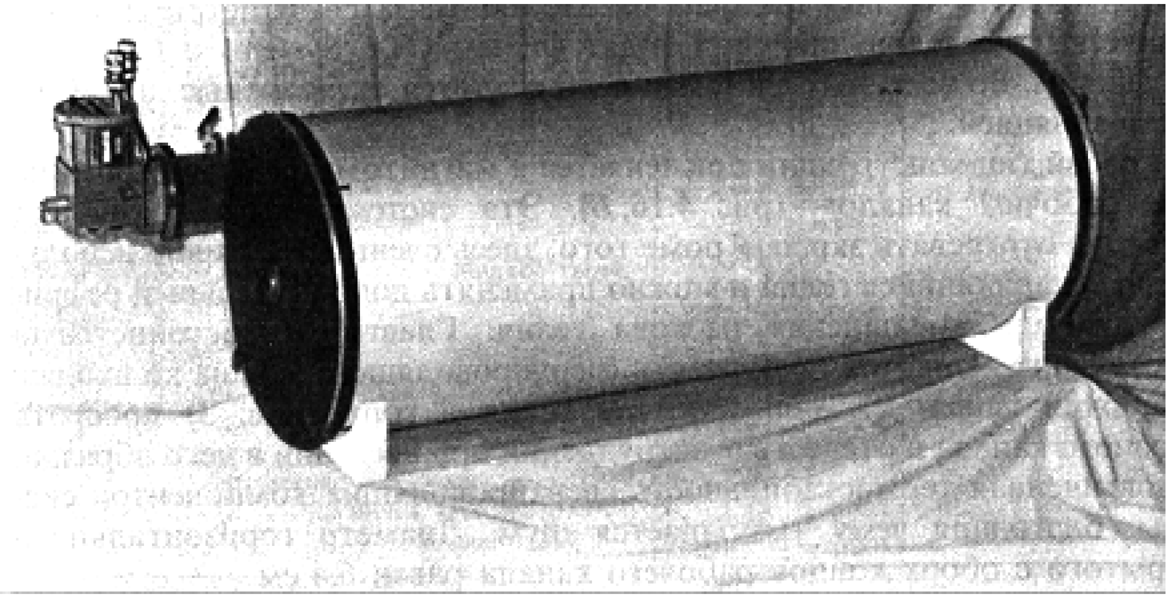
измерительную вставку из прибора. Подобные магнитометры для геофизических исследований производят фирмы CTF Systems и Cryogenic Consultants. Во всех этих системах используются стандартные дьюары с суперизоляцией.

Третий тип конструкции применяется в магнитометре с горизонтальным рабочим каналом (рис. 4.16, *В*). Эта система также позволяет отдельно отогревать экран. Кроме того, здесь очень эффективно используется испаряющийся гелий и можно применять дополнительный рефрижератор для уменьшения расхода гелия. Главными достоинствами конструкции являются: 1) близость сверхпроводящего экрана ко входам в рабочий канал; 2) малые потери гелия в горловине; 3) простота сквозного канала и отсутствие затруднений при введении в него образца; 4) повышенная термостабильность сверхпроводящих компонентов системы, благодаря чему уменьшается шум. Диаметр горизонтального открытого с обоих концов рабочего канала равен 6,4 см.

Система была сконструирована в 1972 г. и с тех пор находится в эксплуатации почти непрерывно. Образцы стандартных размеров вводят в прибор с помощью держателя из пластика. Сквозной рабочий канал позволяет делать ряд измерений, которые невозможно выполнить, используя магнитометр с вертикальным доступом. Это относится, например, к использованию длинных геологических кернов или биомагнитных образцов вытянутой формы. Такой канал удобнее в тех случаях, когда в измерительную область прибора нужно помещать какие-либо устройства, например для термомагнитного анализа.

В новом магнитометре, сконструированном фирмой 2-G Enterprises и пригодном для биомагнитных применений, используется схема с горизонтальным доступом, аналогичная описанной выше, но расход жидкого гелия снижен до 0,17 л/сутки, а уровень шума доведен до 10^{-11} А·м^2 (рис. 4.17). Такая система, вмещающая 100 л гелия, может работать при одной заливке в течение более чем 500 суток.

Система для измерения магнитной восприимчивости, работающая в Калифорнийском университете (Санта-Барбара), имеет вертикальный рабочий канал диаметром 7 мм и похожа на описанные в этом разделе аналогичные магнитометры. Отличие состоит в том, что прибор снабжен сверхпроводящим соленоидом на 2,5 Тл. Сверхпроводящий экран находится внутри соленоида и может захватывать достаточно сильное поле, обеспечивая тем самым его стабильность, необходимую для проведения измерений с высокой чувствительностью. Так, если требуется зарегистрировать индукцию 0,1 Тл с погрешностью 10^{-10} Тл, то измеряемое поле должно быть стабильно с точностью по крайней мере 10^{-9}. Обдувая образец потоком газообразного гелия нужной температуры, можно устанавливать любую температуру в интервале от 4 К до комнатной. Система контроля температуры состоит из теплообменника, в котором образуется газообразный гелий, электрического нагревателя, диодного термометра и электронной схемы, позволяющих регулировать температуру потока газа. Поскольку при этом образец находится при



[illegible] Сквид-магнитометр для геофизических исследований фирмы 2-G Enterprises, модель 760R.

давлении, близком к атмосферному, его замена не составляет труда. Температура в такой системе устанавливается довольно быстро и с хорошей воспроизводимостью.

Подобная же система выпускается фирмой S. H. E. Corporation. В последних моделях максимальная индукция составляла 5 Тл, а диапазон температур 4–400 К. Измерения полностью автоматизированы с помощью компьютера, который управляет перемещением образца и установкой температуры и поля.

5. Применение сквид-магнитометров в биомагнитных исследованиях

Все приборы, описанные в предыдущем разделе, применялись и при проведении биомагнитных исследований. Чтобы облегчить читателю выбор необходимого прибора, мы рассмотрим в этом разделе несколько примеров применения этих приборов для выявления, идентификации и анализа свойств магнитных материалов в биологических образцах.

5.1. Выявление магнитных включений в биологических образцах

Проблема выявления магнитных включений в биологических образцах привлекла к себе внимание сравнительно недавно в связи с исследованиями поведения животных, имевшими цель установить, могут ли эти животные использовать геомагнитное поле для навигации. В этом случае наиболее пригодны использующийся в геофизике магнитометр и градиентометр, описанные выше.

Животных небольшого размера можно помещать в рабочий канал магнитометра целиком; если же это сделать невозможно, приходится прибегать к расчленению животного на части подходящих размеров. Стандартные приборы имеют обычно вертикальный рабочий канал диаметром около 5 см, открытый только сверху. Приборы с горизонтальным открытым с обеих сторон рабочим каналом более удобны, поскольку такая конструкция позволяет пропускать образец через рабочий канал и использовать протяженные образцы. Чувствительность подобных приборов по магнитному моменту обычно составляет $\sim 10^{-11}$ А·м^2. Предварительно намагничивая образец, можно увеличить его остаточную намагниченность и тем самым повысить чувствительность при детектировании магнитных включений (см. гл. 5.)

В случае использования градиентометров образец не нужно помещать внутрь прибора, достаточно перемещать прибор относительно него (или наоборот). Это позволяет обследовать все тело животного, не расчленяя его. При этом отпадает проблема магнитного загрязнения образца в процессе расчленения. Метод сканирования позволяет исследовать и живых животных.

Существуют два подхода к выявлению магнитных включений в биологических образцах с помощью градиентометров. В одном случае измеряют магнитное поле, связанное с остаточным магнитным моментом, в другом индуцируют намагниченность, поместив образец в магнитное поле, и регистрируют поле, связанное с индуцированным моментом. При таких измерениях сквид-градиентометр используется подобно классическому астатическому магнитометру, когда образец в основном взаимодействует с одним из магнитов астатической пары, нечувствительной к однородному магнитному полю.

Градиентометры уже применяются в медицине для регистрации магнитной восприимчивости различных тканей. В простейшем варианте образец намагничивают в однородном постоянном магнитном поле, создаваемом большими катушками Гельмгольца. Такой метод использовался для измерений магнитной восприимчивости тканей печени человека (Farrell et al., 1980), которая зависит от содержания железа в данном органе и может свидетельствовать о каких-то расстройствах кровотворной системы. Вначале измерения проводились с помощью градиентометра второго порядка при низком уровне магнитных шумов. Позже этой же группе ученых удалось провести исследования в клинике, где уровень помех был значительно выше. Для этого они использовали катушку, создававшую поле с определенным градиентом в исследуемом объеме, и градиентометр второго порядка. Чтобы уменьшить влияние положения градиентометра относительно тела пациента на результаты измерений, которое обусловлено различием магнитной восприимчивости диамагнитных воздуха и тканей организма, между телом и дьюаром помещали резиновый мешок с водой (рис. 4.18).

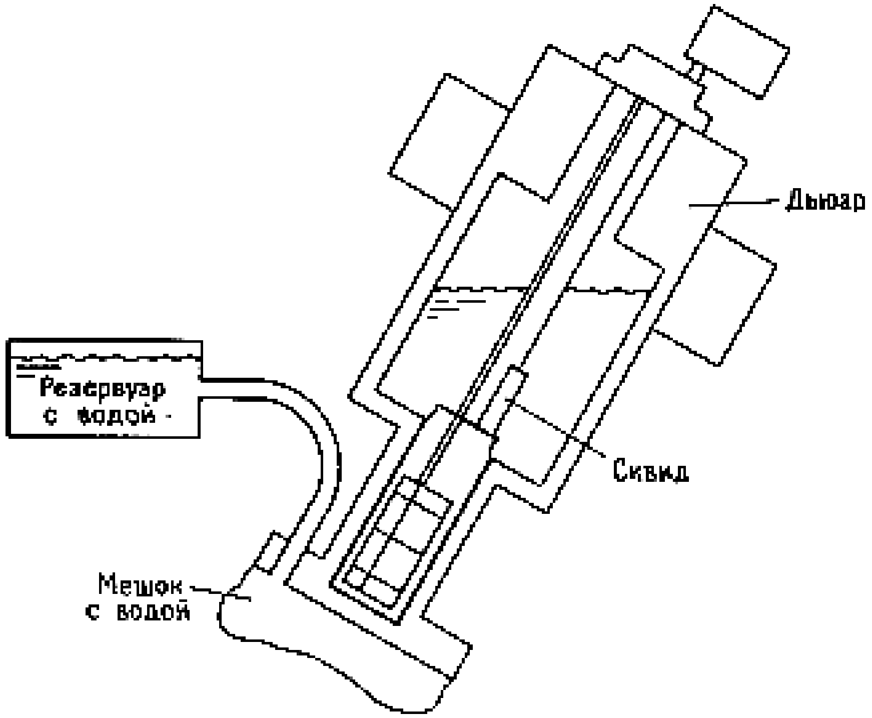


Рис. 4.18. Схема установки для измерения магнитной восприимчивости печени человека, сконструированной в Case Western Reserve University (Romani et al., 1982).

Отношение сигнал/шум в описанном методе измерения в принципе можно повысить, применяя переменное намагничивающее поле и синхронное детектирование. Однако группе упомянутых ученых не удалось улучшить результаты, полученные с использованием постоянного поля. Романи и др. (Romani et al., 1982) объясняют это сильным дрейфом нулевой линии при использовании небольших намагничивающих катушек и плохим пространственным разрешением при использовании больших.

5.2. Идентификация магнитных включений в биологических образцах

Магнитные включения, обнаруживаемые описанными выше методами, могут содержать различные магнитные фазы, идентификация которых представляется важным этапом исследования. Ниже мы обсудим характеристики магнитных фаз и приведем некоторые соображения по поводу применения магнитных методов для их идентификации.

Поскольку намагниченность диамагнитных и парамагнитных образцов в отсутствие магнитного поля равна нулю, их легко идентифицировать по этому признаку. Однако в магнитном поле такие материалы приобретают намагниченность, определяемую формулой

$$M = \chi H,$$

где M — намагниченность, т.е. магнитный момент единицы объема, H — намагничивающее поле, χ — магнитная восприимчивость. В единицах СИ восприимчивость безразмерна, поскольку и M, и H измеряются в единицах А/м.

Восприимчивость диамагнетиков отрицательна и не зависит от температуры. Как уже отмечалось, ткани живых организмов, как и вода, диамагнитны, и их восприимчивость очень мала. Такая широкая распространенность диамагнетиков делает их локализацию и идентификацию не столь интересной.

Восприимчивость парамагнетиков положительна, поскольку в намагничивающем поле H магнитные моменты отдельных атомов и молекул частично выстраиваются вдоль поля. Такому выстраиванию препятствуют тепловые флуктуации. Классическая теория парамагнетизма приводит к следующей зависимости намагниченности M от отношения a энергии магнитного момента μ атома или молекулы в поле H к средней энергии теплового движения:

$$M = N\mu L(a), \tag{35}$$

где

$$a = \mu H/k_B T, \tag{36}$$

а

$$L(a) = \operatorname{cth} a - \frac{1}{a}. \tag{37}$$

При $a \ll 1$

$$L(a) = {}^1/_3, \quad \text{и} \quad M = N\mu^2 H/3k_B T. \tag{38}$$

В этих формулах k_B — постоянная Больцмана, T — температура, $L(a)$ — так называемая функция Ланжевена. Квантовомеханический расчет приводит к аналогичному результату, но вместо функции Ланжевена в уравнение входит функция Бриллюэна. Характерной особенностью, по которой выявляют парамагнитную фазу, служит обратная пропорциональность между восприимчивостью и температурой при малых значениях отношения $\mu H/k_B T$. При этом используют приборы, позволяющие измерять восприимчивость в широком диапазоне температур (обычно от температуры жидкого гелия до комнатной) при достаточно сильных полях. Если в образце присутствуют и диа- и парамагнитная фазы, то по температурной зависимости восприимчивости можно определить их содержание.

В диа- и парамагнетиках взаимодействие между магнитными моментами отдельных атомов и молекул очень мало. Напротив, в ферро-, антиферро- и ферримагнетиках наблюдается значительное обменное взаимодействие, приводящее к упорядочению магнитных моментов. В ферромагнетиках магнитные моменты всех атомов и молекул параллельны друг другу, а в антиферромагнетиках в каждой элементарной

магнитной ячейке одна половина моментов антипараллельна другой так что в отсутствие внешнего магнитного поля намагниченность равна нулю. Ферримагнетиками называются вещества, в которых можно выделить две группы не равных по величине магнитных моментов, направленных навстречу друг другу. Намагниченность ферримагнетика не равна нулю даже в отсутствие магнитного поля. Магнитному упорядочению всегда препятствует тепловое движение; при достаточно высокой температуре упорядочение полностью исчезает и магнитный материал переходит в парамагнитное состояние. Соответствующая температура называется температурой Кюри в случае ферромагнетиков и температурой Нееля в случае анти- и ферримагнетиков. Температура, при которой исчезает магнитное упорядочение, является мерой силы обменного взаимодействия и может использоваться для выявления той или иной магнитной фазы.

Температуру разупорядочения магнитных материалов определяют из температурной зависимости различных параметров: намагниченности, магнитной восприимчивости и т. п. (см., например, Collinson et al., 1967). Для таких исследований можно использовать магнитометр, применяющийся в геофизике, или прибор, измеряющий восприимчивость, снабдив его устройством для нагревания образца. При этом используют разные методы, например лазерный[1] (Day et al., 1976b) или высокочастотный (R. K. Walton, частное сообщение). Кроме того, благодаря малому времени измерения в сквид-магнитометре образец, укрепленный на специальном кварцевом держателе, можно нагреть вне прибора, а затем быстро поместить его в магнитометр. При переносе образца и за время измерений его температура не успевает значительно измениться (J. R. Dunn, неопубликованные данные).

На рис. 4.19 представлены результаты измерений температурной зависимости магнитного момента в поле с индукцией $< 10^{-4}$ Тл. Измерения в таких слабых полях могут использоваться для определения температуры магнитного разупорядочения на основе эффекта Гопкинсона, т. е. по пику начальной восприимчивости вблизи температуры Кюри или Нееля. Однако точный анализ результатов при малых полях затруднен из-за невозможности достаточно просто разграничить остаточную и индуцированную полем намагниченности, и приходится проводить дополнительные измерения в полях порядка нескольких десятков эрстед. В случае антиферромагнетиков такой проблемы не существует, и по результатам измерений в малых полях можно прямо получить температуру Нееля.

Температурные зависимости магнитных свойств образцов можно исследовать и с помощью градиентометров, нагревая образцы вне

[1] См. также работу Heney T. L., Pike S. J. Laboratory piezomagnetic experiments on rocks using a SQUID. In: Applications to Geophysics/Eds. H. Weinstock, W. C. Overton. Soc. Explor. Geophys., Tulsa, Oklahoma, 1981, p. 118–125. *Прим. перев.*

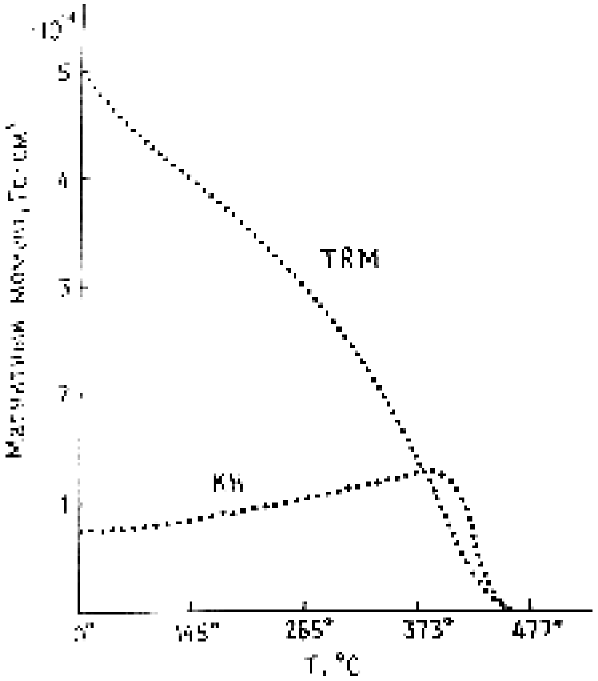


Рис. 4.18. Термомагнитный способ определения температуры Кюри.

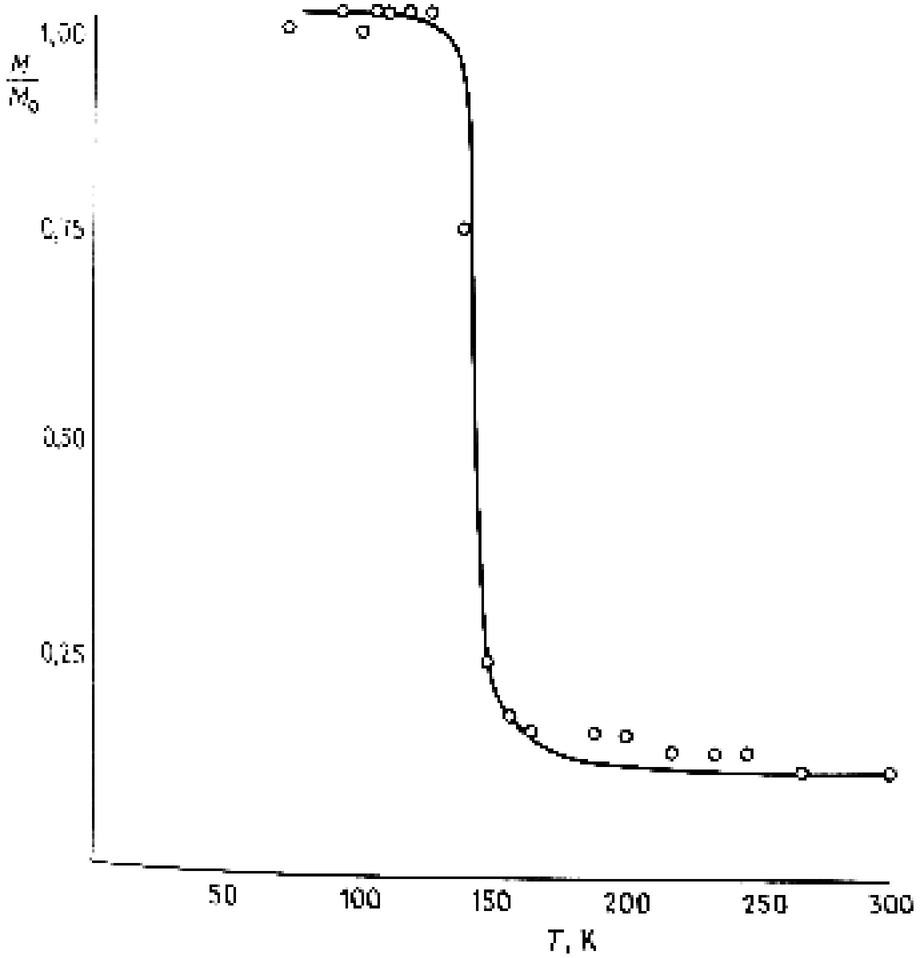


Рис. 4.19. Температурная зависимость остаточной намагниченности многодоменных частиц магнетита в образце тканей ската.

прибора. Очень важной величиной является температура Нееля магнетита наиболее распространенного материала магнитных включений в биологических образцах. Она равна 586 С, т.е. 859 К.

Характерные температурные точки в случае ферро-, ферри- и антиферромагнетиков могут быть связаны не только с магнитным упорядочением, но и с изменением характера магнитной анизотропии, заключающейся в различиях некоторых магнитных свойств по разным направлениям в магнитном образце. Одной из форм магнитной анизотропии

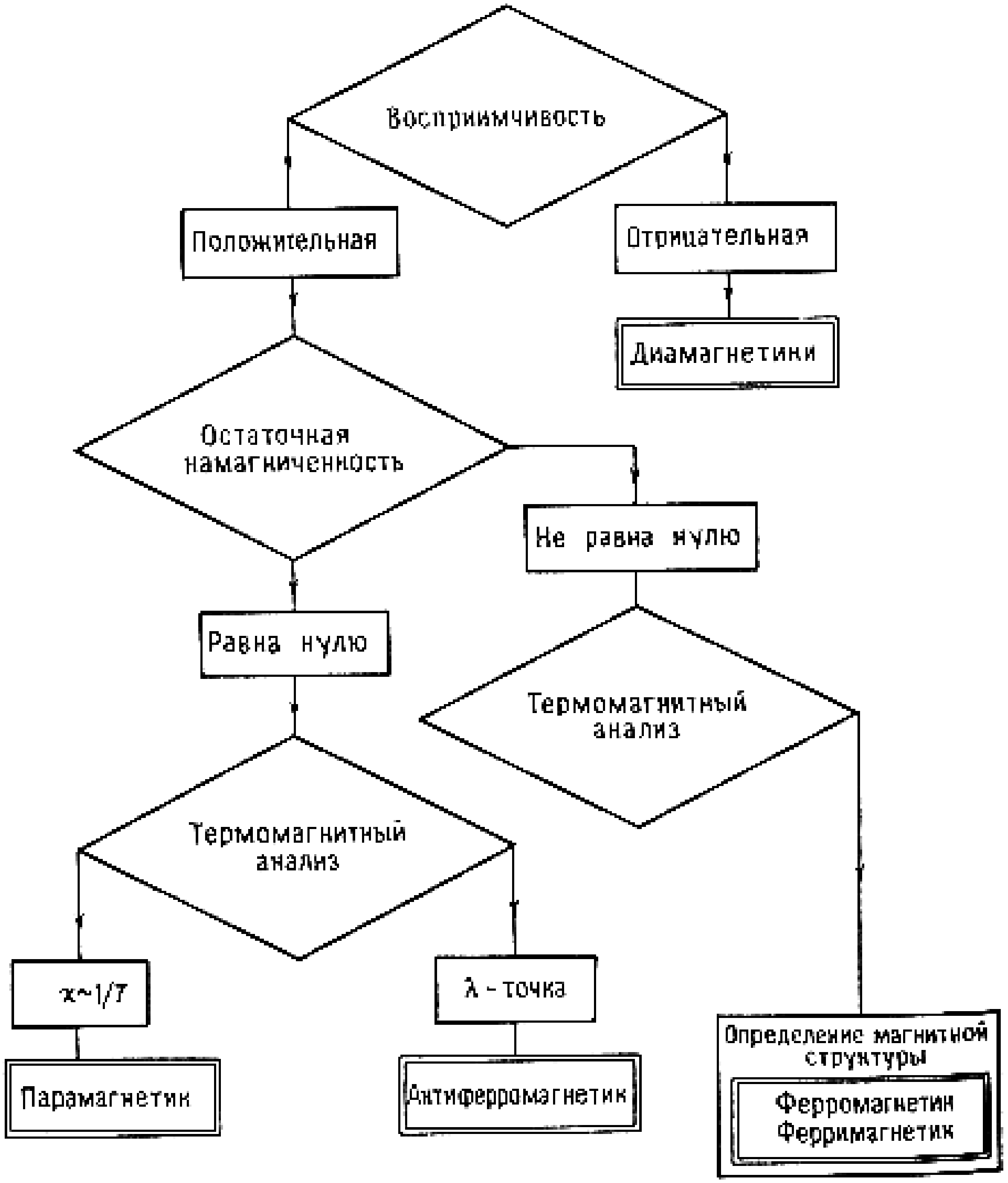


Рис. 4.21. Схема идентификации магнитного материала по магнитным свойствам.

является магнитокристаллическая анизотропия, обусловленная неэквивалентностью разных направлений в кристалле магнитного материала. Так, кристаллы магнетита при комнатной температуре легче всего намагничиваются во внешнем поле, направленном вдоль пространственной диагонали кубической элементарной ячейки, т.е. вдоль кристаллографической оси [111]. Однако при понижении температуры таким направлением становится ребро элементарной ячейки, т.е. ось [100]. Это связано с переходом кристалла в фазу с орторомбической симметрией в результате небольшого искажения кубической элементарной ячейки. Наблюдение за особенностями изменения остаточной намагниченности при таком переходе может служить простым способом выявления магнетита (Nagata et al., 1964; Fuller, Kobayashi, 1964). Измерения проводят при повышении температуры образца от температуры жидкого азота, предварительно намагнитив его до насыщения. Для измерений можно использовать стандартный магнитометр, использующийся в геофизике, или прибор для измерения магнитной восприимчивости в сильных полях. При температуре перехода остаточная намагниченность резко падает и наблюдаются гистерезисные явления (Kobayashi, Fuller, 1968). Результаты измерений для магнетита из тканей ската *Urolophus halleri* приведены на рис. 4.20. Описанный метод применим только для образцов, содержащих достаточно крупные частицы магнетита, в которых остаточная намагниченность меняется при фазовом переходе из-за перестройки доменной структуры. Выявление магнетита, присутствующего в виде однодоменных частиц, требует применения других методов, например измерений температурной зависимости коэрцитивной силы. Нужно отметить, что идентификация магнетита, основанная на регистрации магнитного фазового перехода, позволяет обойтись без нагревания образцов до высоких температур.

Логика применения различных магнитометрических методов для определения характера магнитного упорядочения, а в случае ферро- и ферримагнетиков для определения фазы иллюстрируется схемой, приведенной на рис. 4.21.

5.3. Определение магнитных фаз в биологических образцах

Часто бывает важно знать не только химический состав выявленных в биологическом образце магнитных включений, но и размер зерен и величину взаимодействия между их магнитными моментами. Такая информация необходима, например, для установления структуры магниторецепторов, которая должна сильно зависеть от размеров частиц магнитного материала. Размер зерен можно определить, исследуя самые разные магнитные свойства образца. Известно, однако, что температура магнитного упорядочения и намагниченность не зависят от размера зерен.

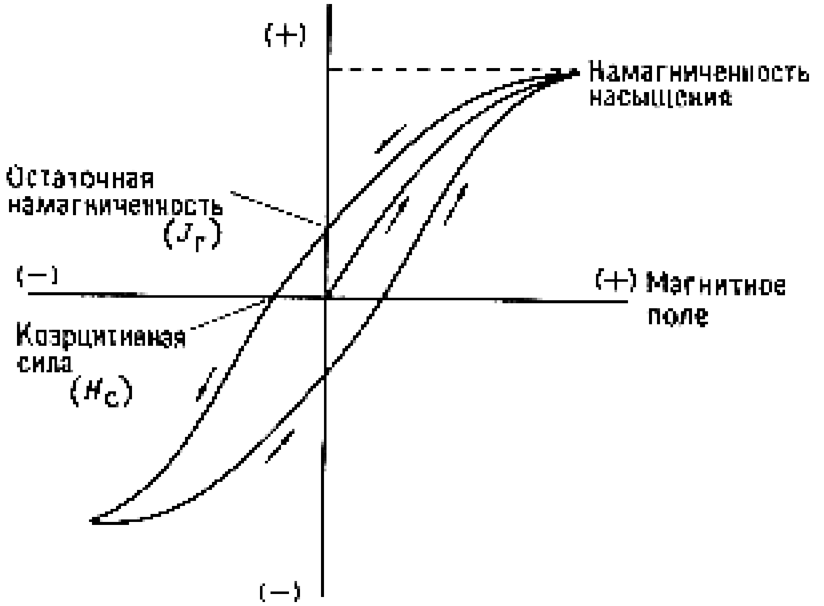


Рис. 4.22. Типичная петля гистерезиса конгломерата мелких однодоменных частиц.

Рассмотрим теперь петлю магнитного гистерезиса (см. ниже) как характеристику магнитного материала, и в первую очередь зависимость формы петли от размера зерен. Нужно отметить трудоемкость получения петли гистерезиса с помощью сквид-магнитометра, поскольку для изменения намагничивающего поля в сквид-системе требуется отогреть и вновь охладить сверхпроводящий экран при новом значении поля.

Поведение намагниченности образца, состоящего из мелких частиц, при изменении магнитного поля иллюстрирует рис. 4.22. При увеличении поля намагниченность, равная нулю в исходном состоянии, растет и достигает насыщения (J_S). По мере последующего уменьшения поля до нуля образец переходит в состояние с остаточной намагниченностью (J_r). Эти явления объясняются двумя обстоятельствами. Во-первых, магнитные моменты атомов в отдельных зернах образца ориентируются параллельно друг другу благодаря обменному взаимодействию. Во-вторых, в каждом зерне существует ось легкого намагничивания; например, если предположить, что зерна имеют вид вытянутых эллипсоидов, то ею будет длинная ось. В этом случае, векторы намагниченностей зерен в исходном состоянии направлены вдоль легких осей, так что суммарный магнитный момент образца равен нулю. По мере увеличения внешнего поля направления всех магнитных моментов будут приближаться к направлению поля, пока не будет достигнуто состояние насыщения, в котором все магнитные моменты параллельны полю. При последующем уменьшении поля магнитные моменты возвращаются к ближайшим к направлению поля осям легкого намагничивания, что приводит к появлению остаточной намагниченности в нулевом поле, поскольку теперь из двух, вообще говоря, эквивалентных осей магнитный момент будет «выбирать» то, которое ближе к направлению внешнего поля. Если

затем приложить возрастающее поле в направлении, противоположном первоначальному, то при достаточно большом поле будет достигнуто насыщение намагниченности, направленной теперь в соответствии с новым направлением поля. Получающуюся в результате зависимость намагниченности от поля и называют петлей гистерезиса.

Петли гистерезиса бывают самыми разнообразными по форме. Одним из факторов, влияющих на форму петли, является размер частиц образца, причем увеличение их размера приводит, как правило, к тому, что материал становится более мягким, т. е. уменьшается поле, необходимое для его перемагничивания (рис. 4.22. и 4.23). Объясняется это тем, что основным процессом при намагничивании очень мелких однодоменных частиц является поворот магнитного момента частицы в сторону поля (рис. 4.24, *A*), в то время как намагничивание крупных частиц осуществляется путем смещения доменных стенок, происходящего при меньших полях, чем поворот моментов (рис. 4.24, *Б*). Частицы среднего размера обычно бывают разделены на области – домены с разным направлением намагниченности, что уменьшает энергию магнитного поля, создаваемого магнитным моментом частицы.

Итак, петля гистерезиса позволяет выделить три характерных состояния. Первое состояние насыщения, когда все магнитные моменты направлены вдоль внешнего поля. Второе состояние с остаточной намагниченностью в нулевом поле, которое «помнит» направление достигнутой перед этим намагниченности насыщения. И третье – размагниченное состояние в поле коэрцитивности, т. е. в поле, направленном навстречу намагниченности и сводящем ее к нулю. Обычно указанное поле называют коэрцитивной силой. Для однодоменных частиц намаг-

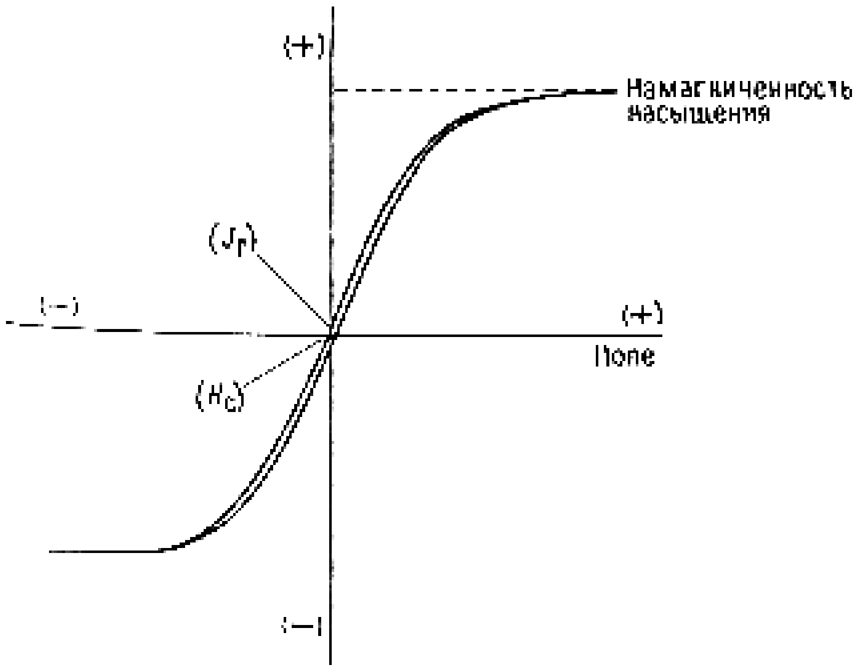


Рис. 4.23. Типичная петля гистерезиса для многодоменного образца.

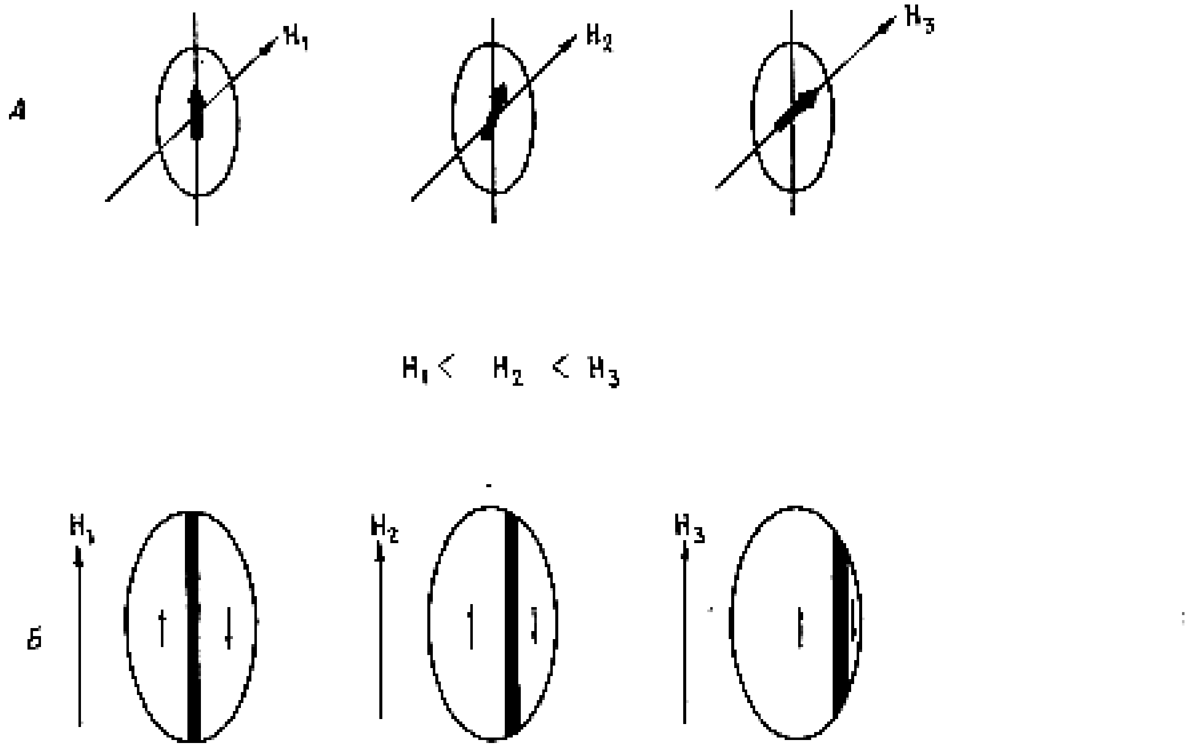


Рис. 4.24. Процессы намагничивания. *А*. Поворот магнитного момента в однодоменных частицах. *Б*. Перемещение доменных стенок в многодоменных частицах.

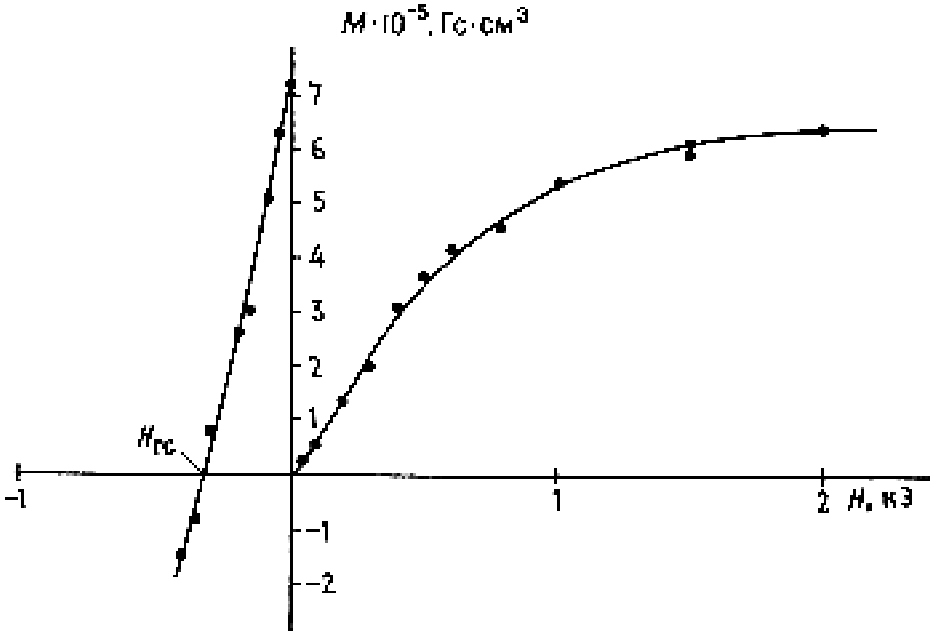


Рис. 4.25. Зависимость магнитного момента препарата твердой мозговой оболочки кита от магнитного поля при ступенчатом намагничивании и размагничивании (см. текст).

ниченность насыщения не сильно превышает остаточную намагниченность, а коэрцитивная сила довольно высока — порядка 10^4–10^5 А/м. В многодоменных образцах, где намагниченность изменяется из-за смещения доменных границ, коэрцитивная сила значительно меньше, а остаточная намагниченность может составлять малую долю намагниченности насыщения.

Таким образом, размеры частиц в образце можно оценить, исследуя магнитные характеристики, резко различающиеся в одно- и многодоменном состояниях (см., например, Day et al., 1967a). Подобными характеристиками могут служить отношение остаточной намагниченности к намагниченности насыщения и коэрцитивная сила. На рис. 4.25 представлены зависимости магнитного момента препарата твердой мозговой оболочки кита от приложенного поля. Это магнитно-твердый материал: чтобы достичь намагниченности, равной половине намагниченности насыщения, необходимо приложить поле ~500 Э, а для получения насыщения необходимо поле 2 кЭ. Коэрцитивная сила равна примерно 300 Э. Данные, подобные изображенным на рис. 4.25, сравнительно легко получить с помощью криогенного магнитометра, поскольку при этом измеряется только остаточная намагниченность. Намагничивать образцы можно в отдельном соленоиде или электромагните.

Еще одним методом определения магнитной твердости материалов служит размагничивание в переменном поле звуковой частоты (см., например, Collinson et al., 1967). Соответствующее оборудование обычно имеется в лабораториях, где занимаются палеомагнитными исследованиями.

Совместное использование опытов по намагничиванию в постоянном поле и размагничиванию в переменном позволяет исследовать взаимодействия между магнитными частицами (Cisowski, 1981). Сравнение соответствующих зависимостей (рис. 4.26) показывает, что в отсутствие взаимодействия кривые симметричны (рис. 4.26, *А*), а в тех случаях, когда частицы взаимодействуют (рис. 4.26, *Б*), симметрия нарушается. Последние данные (рис. 4.26, *Б*) получены на образцах зубцов хитона, в которых, как известно, частицы магнетита упакованы достаточно плотно, и поэтому взаимодействие между ними должно быть сравнительно сильным (Lowenstam, 1962). Кривые, соответствующие упомянутым процессам намагничивания и размагничивания, пересекаются в точке, отвечающей так называемому полю остаточной коэрцитивности. Рассматриваемый метод позволяет также отличать образцы, состоящие из многодоменных частиц, от образцов из взаимодействующих однодоменных частиц. На рис. 4.26, *В* приведены кривые для породы, содержащей многодоменные частицы магнетита. Видно, что многодоменные частицы легче намагничиваются в малых полях и раньше достигают насыщения.

Магнитная гранулометрия находит применение и в лимнологии для выяснения природы намагниченности донных отложений в озерах. Возможно, часть магнетита этих отложений имеет биологическое происхож-

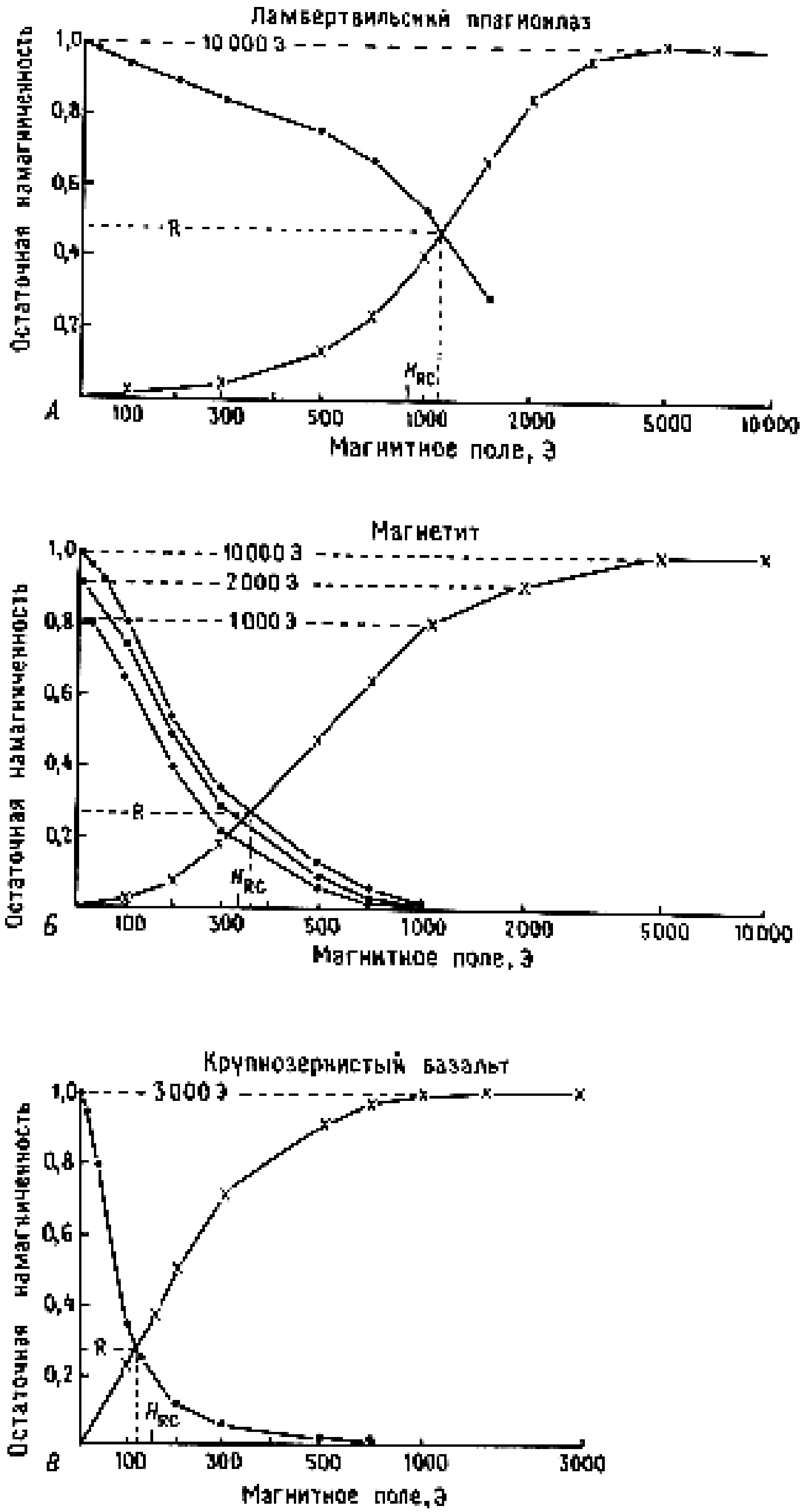


Рис. 4.26. Кривые намагничивания в постоянных полях (крестики) и размагничивания (точки) в полях звуковых частот (см. текст) для образцов с различными магнитными включениями (Cisowski, 1981). *А*. Слабо взаимодействующие однодоменные частицы. *Б*. Сильно взаимодействующие однодоменные частицы. *В*. Многодоменные частицы. По оси ординат отложена нормированная остаточная намагниченность, по оси абсцисс – магнитное поле.

дение. Интересный гранулометрический метод предложен в работе King et al., 1982. В этом методе используются два параметра. Один – это так называемая идеальная остаточная намагниченность (см. гл. 2), т.е. намагниченность, возникающая при размагничивании образца полем звуковой частоты уменьшающейся амплитуды в присутствии дополнительного внешнего постоянного поля. Величина идеальной остаточной намагниченности сильно зависит от присутствия в образце однодоменных частиц. Другой параметр – начальная восприимчивость, чувствительная к наличию многодоменного состояния. На рис. 4.27 приведены экспериментальные данные, полученные для разных образцов (рис. 4.27, *А*), и соответствующая диаграмма для специально приготовленных образцов, служивших моделью. Описанный метод может оказаться особенно полезным для гранулометрического анализа магнетита в биологических объектах.

При описании методов магнитной гранулометрии мы до сих пор предполагали, что размер зерен достаточно велик, чтобы реализовывалось по крайней мере однодоменное состояние. Однако в мелкодисперсных порошках ферро- и ферримагнетиков однодоменное состояние перестает быть стабильным при размерах зерна, меньших некоторого критического, и возникает суперпарамагнитное состояние.

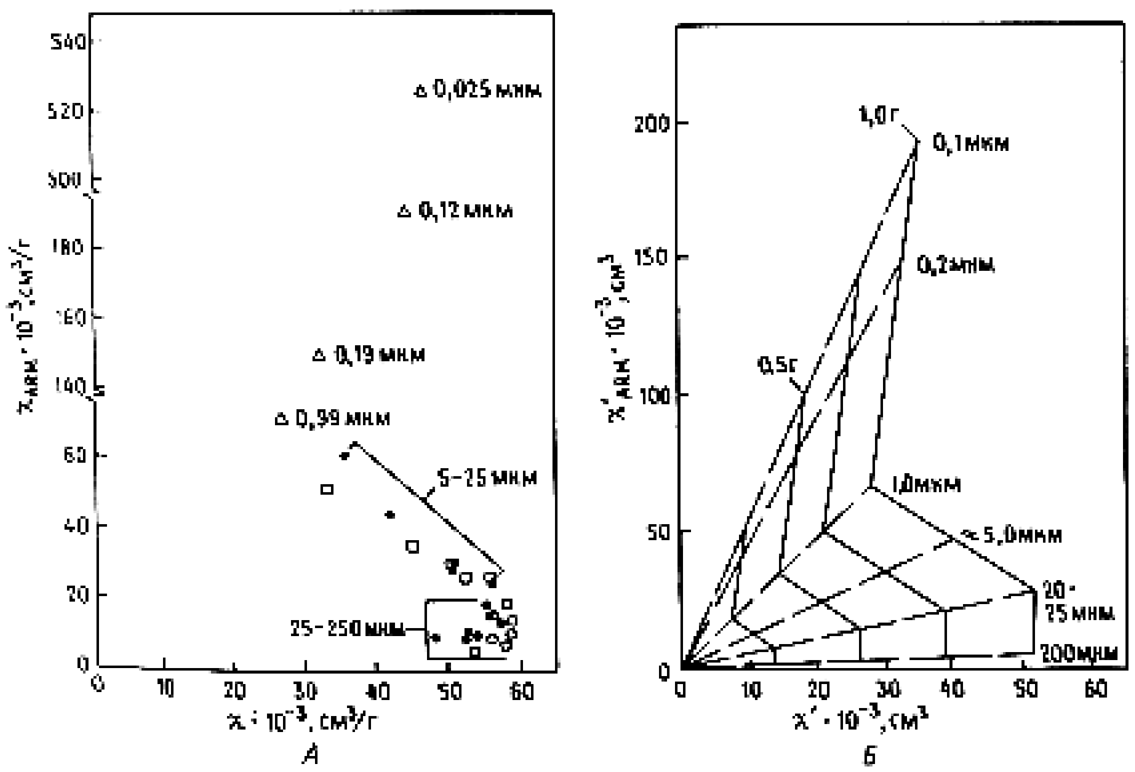


Рис. 4.27. Гранулометрия, проведенная по данным об идеальной (χ_{ARM}) и начальной (χ_0) магнитной восприимчивости (King et al., 1982). *А*. Экспериментальные данные разных авторов: треугольники – Ozdemir, Banerjee, 1981; кружки и квадратики – Dankers, 1978. *Б*. Данные, рассчитанные для образца с равномерно распределенными частицами магнетита Fe_3O_4, на долю которых приходится примерно 1% объема образца.

Изменение намагниченности M в процессе релаксации описывается уравнением

$$dM/dt = -M/\tau.$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$M = M_0 \exp(-t/\tau),$$

где M_0 – постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий, t – время, τ – время релаксации. Время релаксации зависит от плотности энергии магнитной анизотропии K, объема частицы V и температуры T:

$$\tau^{-1} = f_0 \exp(-KV/k_{\text{в}}T).$$

При изменении температуры T и объема частиц V происходят резкие переходы от однодоменного состояния с очень большим временем релаксации τ к суперпарамагнитному, для которого τ мало. Термин «суперпарамагнетизм» отражает сходство суперпарамагнетиков и обычных парамагнетиков, проявляющееся, например, в отсутствии остаточной намагниченности. При этом поведение магнитного момента суперпарамагнитной частицы аналогично поведению момента отдельного атома или молекулы в парамагнетике.

Суперпарамагнитное состояние может реализовываться в биологических объектах и применяться в биомагнитных исследованиях, обсуждающихся в этой книге (см., например, Kirschvink, Gould, 1981). Методы идентификации суперпарамагнитного состояния основаны на том, что в суперпарамагнетиках отсутствие остаточной намагниченности сопровождается большими значениями магнитной восприимчивости. В этих методах используются также зависимости соответствующих характеристик от температуры и размера частиц. Так, если материал суперпарамагнитен, то должна существовать температура, ниже которой становится устойчивым однодоменное состояние частиц и время релаксации намагниченности образца резко возрастает. Время релаксации и его зависимость от температуры легко измерить с помощью сквид-магнитометра, применяющегося в геофизике: образец намагничивают вне прибора, затем помещают в магнитометр и наблюдают, как спадает остаточная намагниченность. Зависимость остаточной намагниченности от температуры может свидетельствовать о переходе из суперпарамагнитного состояния с равной нулю остаточной намагниченностью в однодоменное, обладающее значительной остаточной намагниченностью. При переходе из суперпарамагнитного в однодоменное состояние должно наблюдаться и резкое уменьшение магнитной восприимчивости, что также может быть зарегистрировано с помощью сквид-магнитометра в малых полях, захватываемых сверхпроводящим экраном.

Использование различных магнитных явлений для анализа состояния магнетита в образцах иллюстрирует рис. 4.28. Как отмечалось выше, такой анализ может быть использован и в целях гранулометрии. При

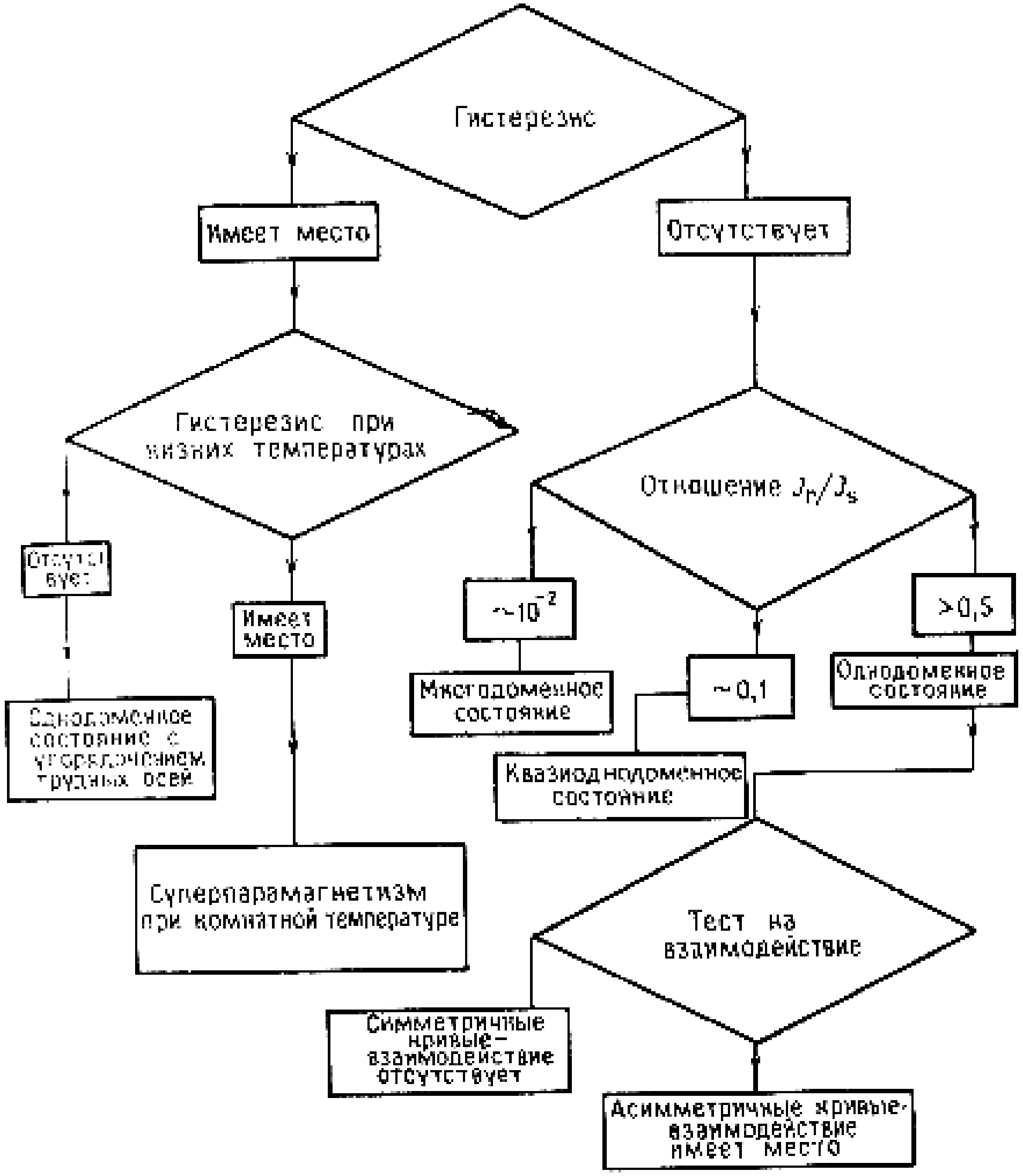


Схема определения доменного состояния с помощью магнитометрических измерений.

этом выбор конкретного метода определяется имеющейся аппаратурой и целями исследования.

6. Заключение

За последнее десятилетие сквид-магнитометр стал основным прибором для проведения биомагнитных исследований. Есть основания утверждать, что роль этого прибора в будущем еще более возрастет. По-видимому, с развитием экспериментальной техники большинство (а

возможно, и все) исследований, в которых необходимо идентифицировать магнитные включения в биологических объектах и определить их характеристики, будут осуществляться с помощью высокочувствительных и имеющих широкий частотный диапазон сквид-магнитометров.

Одним из самых интересных и многообещающих направлений биомагнитного приборостроения, не рассмотренных в этой главе, является конструирование магнитометров для измерения магнитных полей, связанных с жизнедеятельностью живых организмов. Как мы отмечали во введении, из такого рода применений наиболее перспективны магнитоэнцефалография, магнитокардиография, а также исследования магнитного поля нервных импульсов. Возможно, магниторецепторы, если они существуют, будут обнаружены именно с помощью сквид-магнитометрии.

Десять с небольшим лет назад в статье, посвященной применению сквидов в гео- и палеомагнетизме (Goree, Fuller, 1976), мы говорили о том, что открытия Джозефсона и других всего за 15 лет произвели настоящую революцию в геофизике. И теперь техника, появляющаяся благодаря тем же основополагающим работам, может привести к существенному прогрессу во многих областях биологии.

Литература

Anderson P. W., Rowell J. M. (1963). Probable observation of the Josephson superconducting tunnelling effect, Phys. Rev. Lett., **10**, 230–232.

Bannister J. D., 1966. Spontaneous pressure oscillations in tubes connecting liquid helium reservoirs to 300 K environments. In: Pure and Applied Cryogenics, **Vol. 6**, Pergamon Press, Elmsford, New York.

Bardeen J., Cooper L. N., Schrieffer J. R. (1957). Theory of superconductivity, Phys. Rev., **108**, 1175.

Brandt R., Nisenoff M., Edelsack E., 1979. Superconductor Materials Science (S. Foner and B. Schwartz, eds.), Plenum Press, New York.

Cisowski S. (1981). Interacting vs. non-interacting single-domain behavior in natural and synthetic samples, Phys. Earth Planet. Inter., **26**, 56–62.

Clarke J. (1974). Josephson junction detection, Science, **184**, 1235–1242.

Clarke J., Goubau W. M., Ketchen M. B. (1985). A reliable dc Squid made with tunnel junctions. IEEE Trans. Magn., **Mag-11**, 724.

Collinson D. W. (1975). Instruments and techniques in paleomagnetism and rock magnetism, Rev. Geophys. Space Phys., **43**, 659–686.

Collinson D. W., Creer K. M., Runcorn S. K., 1967. Methods in Paleomagnetism, Elsevier, Amsterdam.

Day R., Fuller M., Schmidt V. A. (1976a). Magnetic hysteresis properties of synthetic titanomagnetites, J. Geophys. Res., **81**, 873.

Day R., Dunn J. R., Fuller M. (1976b). Intensity determination by continuous thermal cycling, Phys. Earth Planet. Inter., **13**, 301–304.

Deaver B., Fairbank W. M. (1961). Experimental evidence for quantized flux in superconducting cylinders, Phys. Rev. Lett., **7**, 43.

Doll R., Nabauer N. (1961). Experimental proof of magnetic flux quantization in a superconducting ring, Phys. Rev. Lett., **7**, 51.

Erne S., 1983. Squid sensors. In: Biomagnetism: An Interdisciplinary Approach (S. J. Williamson, G.-L. Romani, L. Kaufman, and I. Modena, eds.), Plenum Press, New York, pp. 706.

Farrell D. E., Tripp J. H., Zanzucchi P. E., Harris J. W., Brittenham G. M., Muir W. A. (1980). Magnetic measurement of human iron stores, IEEE Trans. Magn., **Mag-16**, 818–823.

Feynman R., Leighton R. B., Sands M., 1965. Lectures on Physics, Vol. 3, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts. [Имеется перевод: *Фейнман Р., Лейтон Р. и др.* Фейнмановские лекции по физике. – М.: Мир, 1966.]

Forgacs R. L., Warnick A. (1967). Digital-analog magnetometer utilizing superconducting sensor, Rev. Sci. Instrum., **38**, 214–220.

Fuller M., Kobayashi K. (1964). Identification of magnetite and hematite in rocks by magnetic observations at low temperature, J. Geophys. Res., **69**, 2111–2120.

Gamble T. D., Goubau W. M., Ketchen M. B., Clarke J. (1978). Regulator for controlling liquid helium bath near 4.2K, Rev. Sci. Instrum., **49**, 119.

Gibbons R. M., 1971. Thermophysical data for cryogenic materials. In: Cryogenic Fundamentals (G. G. Haselden, ed.), Academic Press, New York.

Ginsberg D. M. (1970). Magnetic susceptibilities of some materials which may be used in cryogenic apparatus, Rev. Sci. Instrum., **41**, 1661.

Goree W. S., Fuller M. (1976). Magnetometers using RF driven SQUIDs and their applications in rock magnetism and paleomagnetism, Rev. Geophys. Space Phys., 14, 591–608.

Jaklevic R. C., Lambe J., Mercereau J. E., Silver A. H. (1965). Macroscopic quantum interference in superconduction, Phys. Rev. A **140**, 1628–1637.

Josephson B. D. (1962). Possible new effects in superconductive tunnelling, Phys. Lett., 1, 251–253.

Josephson B. D. (1974). The discovery of tunnelling supercurrents, Science, **184**, 527–530.

King J., Banerjee S. K., Marvin J., Özdemir O. (1982). A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials, Earth Planet. Sci. Lett., **59**, 404–419.

Kirschvink J. L., Gould J. L. (1981). Biogenic magnetite as a basic for magnetic field sensitivity in animals, BioSystems, 13, 181–201.

Kobayashi K., Fuller M. (1968). Stable remanence and memory phenomenon in multidomain magnetite, Philos. Mag., 18, 601–611.

London F., 1950. Superfluids. Vol. 1. Wiley, New York, p. 152.

Long H. M., Loveday P. E., 1968. Safe and efficient use of liquid helium. In: Technology of Liquid Helium (R. H. Kropschot, B. W. Birmingham, and D. B. Mann, eds.), U.S. National Bureau of Standards Monograph III.

Lowenstam H. A. (1962). Magnetite in denticle capping in recent chitons (Polyplacophora), Geol. Soc. Am. Bull., 73, 435–438.

Mercereau J. E. 1967. Modulated flux flow in superconducting films. In: Proceedings of the Symposium on the Physics of Superconducting Devices, Rep. No. 7023, Naval Research Laboratory, Washington, D.C.

Mercereau J. E. (1970). Superconducting magnetometers, Rev. Phys. Appl., **5**, 13–20.

Molnar W. 1971. Insulation. In: Cryogenic Fundamentals (G. G. Haselden, ed.), Academic Press, New York.

Nagata T., Kobayashi K., Fuller M. (1964). Identification of magnetite and hematite in rocks by magnetic observations at low temperatures, J. Geophys. Res., **69**, 2111–2120.

Néel L. (1955). Some theoretical aspects of rock magnetism, Adv. Phys., 4, 191.

Nisenoff M. (1970). Superconductive magnetometers with sensitivities approaching 10 [illegible] gauss, Rev. Phys. Appl., 5, 21–24.

Powell R. L., Blanpied W. A., 1954. Thermal conductivity of metals and alloys at low temperatures, N. B. S. Circular 556.

Prober D. E. 1975. Magnetic susceptibilities of construction materials useful for SQUID susceptometers, Ph. D. thesis, Harvard University, Available as Technical Report No. 10, Tinkham Series, Harvard University.

Romani G. L., Williamson S. J., Kaufman L. (1982). Biomagnetic instrumentation, Rev. Sci. Instrum., **53**, 1815–1845. [Имеется перевод: *Романи Г., Уильямсон С.*,

Кауфман Н. (1982). Аппаратура для исследования биомагнитных полей (обзор). Приборы для научных исследований, № 12, 3–40.]
Salinger G. L., Wheatley J. C. (1961). Magnetic susceptibility of materials commonly used in the construction of cryogenics apparatus, Rev. Sci. Instrum., **32**, 872.
Scott L. E., VanMeerbake R. C., Kirk B. S., Nubel G. C., (1968). Storage, distribution and handling. In: Technology of Liquid Helium (R. H. Kropschot, B. W. Birmingham and D. B. Mann, eds.), U. S. National Bureau of Standards Monograph III.
Scott R. B., (1959). Cryogenic Engineering, Van Nostrand, Princeton, N. J.
Silver A. H., Zimmerman J. E. (1967). Quantum states and transitions in weakly connected superconducting rings, Phys. Rev., **157**, 317–341.
Vrba J., Fife A. A., Burbank M. B., Weinberg H., Brickett F. A. (1982). Spatial discrimination in SQUID gradiometer and 3rd order gradiometer performance, Can. J. Phys., **60**, 1–12.
White G. K., 1979. Experimental Techniques in Low-Temperature Physics, 3rd ed., Oxford University Press (Clarendon), London.
Zimmerman J. E., Thiene P., Harding J. T. (1970). Design and operation of stable RF biased superconducting point contact quantum devices and a note on the properties of perfectly clean metal contacts, J. Appl. Phys., **41**, 1572.

Глава 5
ОБНАРУЖЕНИЕ, ВЫДЕЛЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКА БИОГЕННОГО МАГНЕТИТА

М. М. Уокер, Дж. Л. Киршвинк, А. Перри, А. Дайзон[1]

1. Введение

Попытки охарактеризовать отложения магнетита в тканях многоклеточных животных встречают ряд трудностей. Обычно мы вынуждены иметь дело с очень малыми количествами материала, диспергированного в тканях, а используемые косвенные методы являются источником загрязнения. Кристаллы магнетита, найденные в брюшных сегментах пчел (Gould et al., 1978) и в голове голубей (Walcott et al., 1979) и других позвоночных (гл. 20, 21 и 24), имеют субмикроскопические размеры (< 100 нм), массу 1–100 нг и занимают суммарный объем от 10^{-10} до 10^{-8} см^3. Обнаружение таких количеств магнетита по их магнитным свойствам в организмах весом до 100 кг и более возможно только благодаря тому, что кристаллы сконцентрированы в небольших различимых структурах, а не распределены равномерно по всем тканям. Выделение кристаллов зависит также от того, достаточна ли их концентрация в этих структурах, так чтобы эти кристаллы можно было зарегистрировать магнитометрическими методами.

Невозможность отличить загрязнения экзогенным магнитным материалом от эндогенных частиц и влияние этих загрязнений на результаты биомагнитных исследований сильно сдерживали прогресс в выяснении происхождения и функций биогенного магнетита. Магнетит – это обычный промышленный загрязнитель, и его часто находят на наружных покровах тела или в кишечнике высших животных (Kirschvink, 1983). Типичные кристаллы магнетита диаметром 100 нм, найденные у пчел и голубей (Gould et al., 1978; Walcott et al., 1979), обладают магнитным моментом около 0,5 фА·м^2, в то время как 10-микронные пылевые частицы могут иметь момент вплоть до 500 пА·м^2. Магнитный момент

[1] *Michael M. Walker and Andrew E. Dizon*, Southwest Fisheries Center La Jolla Laboratory, National Marine Fisheries Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, La Jolla, California 92038. *Joseph L. Kirschvink*, Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125. *Anjanette Perry*, Department of Oceanography, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii 96822.

многодоменной частицы можно легко зарегистрировать с помощью обычно используемых для этой цели сверхпроводящих магнитометров, характеризующихся пределом чувствительности 1–10 пА·м², тогда как для регистрации 10^3–10^4 однодоменных частиц необходимо, чтобы их моменты были выстроены в линию. Кроме того, образцы горных пород, которые имеют тенденцию к образованию тонкодисперсной ферро- или ферримагнитной пыли и нередко присутствуют в лабораторных условиях, в частности в палеомагнитных лабораториях, часто вносят дополнительный вклад в магнитное загрязнение. Легкость, с которой загрязнения могут появиться на любой стадии биомагнитных исследований, диктует не только жесткие требования к методическим процедурам, благодаря которым сводится к минимуму риск загрязнения, но и вынуждает искать подходы, позволяющие специфически различать загрязнения и истинные биохимические отложения. Для этого необходимо знать, какие характеристики биогенного магнетита уникальны.

Биогенный магнетит интересен прежде всего как потенциальный передатчик информации о геомагнитном поле в нервную систему. Киршвинк и Уокер (гл. 11) считают, что в этом плане наиболее важны физические свойства кристаллов и наиболее вероятной формой используемого в магниторецепции магнетита являются однодоменные кристаллы. Это должно приводить к сужению кривой распределения частиц магнетита по размерам. Следовательно, пригодные для магниторецепции частицы должны иметь бóльшую коэрцитивную силу, чем многодоменный магнетит (< 20 мТл; Zoeger et al., 1981), но меньшую, чем теоретически максимальное значение для одиночных доменов (300 мТл; McElhinny, 1973). Суперпарамагнитные частицы биогенного магнетита (Gould et al., 1978) без использования специальных подходов обнаружить трудно. В поисках пригодного для магниторецепции магнетита мы в первую очередь должны попытаться различить одно- и многодоменные кристаллы.

Пока у нас нет доказательств, что магнетит может естественным образом попадать из кишечника или внешней среды в кровяное русло, а затем транспортироваться туда, где его обнаруживают. Вероятнее всего, используемые для магниторецепции частицы синтезируются (преимущественно ферментативным путем) в самом организме. Можно ожидать, что вследствие высокой специфичности ферментативного синтеза биогенный магнетит содержит очень мало примесей, характерных для магнетита геологического происхождения или металлов, используемых для получения сплавов на основе железа (Lowenstam, Weiner, 1983). Таким образом, разумно предположить, что пригодные для магниторецепции частицы магнетита можно отличить от геологических и синтетических магнетитов по их физическим и химическим свойствам.

Во многих тканях различных видов животных был найден магнетит или магнитный материал, не имеющий явной магниторецепторной функции (Lowenstam, 1962; Presti, Pettigrew, 1980; Kirschvink, 1981; Kirschvink et al., 1982). За исключением хитонов, которым магнетит

нужен для укрепления зубцов радулы (Lowenstam, 1962), роль этих включений неясна. Есть гипотезы о том, что данные включения служат для депонирования избытков железа или имеют патологическое происхождение (Lowenstam, Weiner, 1983). Гораздо сложнее предложить характеристики, по которым эти частицы можно было бы отличить от других магнетитов. Важен, однако, уже сам факт внимания к этим включениям, поскольку они могут быть предшественниками магнетита, используемого для магниторецепции (Kirschvink, Gould, 1981; гл. 20).

В данной главе мы рассмотрим методы, обычно используемые для детектирования и характеристики биогенного магнетита, а также методические подходы, позволяющие избежать загрязнения, и примеры легко выполнимых специфических тестов на загрязнители. И наконец, мы попытаемся описать дополнительные приспособления, которые могут оказаться полезными для определения, выделения и анализа биогенного магнетита.

2. Магнитометрические исследования

Как уже отмечали мы и другие авторы, основная проблема при изучении биогенного магнетита – это случайное загрязнение образцов. В лабораторных палеомагнитных исследованиях риск загрязнения стараются уменьшить путем тщательного протирания и покрытия стен, пола и потолка тонкой полиэтиленовой пленкой. Создание в последнее время специальных чистых лабораторий для биомагнитных исследований исключило многие связанные с загрязнением проблемы (Kirschvink, 1983). Однако было обнаружено, что источниками загрязнения могут быть ворс на одежде или волосы человека. В будущем мы надеемся исключить и эти источники, используя специальную одежду и душ с деионизованной водой.

Проводить вскрытия и готовить препараты для измерений на магнитометре необходимо только немагнитными инструментами. Обычные металлические хирургические инструменты – пилы для костей, скальпели, пинцеты могут оставить следы сильномагнитных частиц. Даже инструменты, сделанные из немагнитных металлов, например алюминия или меди, часто содержат маленькие ферромагнитные включения, достаточные для того, чтобы помешать использованию этих инструментов. Оставленные этими инструментами в тканях животных магнитные частицы легко обнаружить, но выяснить их происхождение можно только после расширенных тестов на их магнитные свойства (см. ниже).

Наиболее пригодные материалы для препаративного инструментария – дерево, пластмасса и стекло. Мы нашли, что лучше всего для вскрытия подходят стеклянные микротомы, которые можно легко найти в лабораториях электронной микроскопии. Для закрепления кусочков ткани при измерении на магнитометре идеальны обычные деревянные палочки. Хотя они и имеют некоторый магнитный момент, многократное промывание и перестановка палочек позволяют свести к минимуму

риск появления загрязнения на образце или переноса примеси из другого источника. Вероятность загрязнения можно также уменьшить многократным промыванием оборудования, находящегося в контакте с пробами, в дистиллированной воде (причем перегнанной в стеклянном дистилляторе) и продолжительной его очисткой ультразвуком в дистиллированной воде или 6 н. HCl.

Еще один путь уменьшения риска магнитного загрязнения - работа с целыми телами животных, а не с какими-то их частями, отсеченными с помощью металлических пил или ножей (гл. 20). Пилы могут ввести магнитные частицы прямо в ткани, а в процессе препарирования эти частицы могут распространиться по всему объему. Их присутствие и вклад в магнитный момент ткани определяют только с помощью особых расширенных тестов. Работая с рыбами, мы обнаружили, что ювенильных или неполовозрелых особей с незаконченным образованием костной ткани препарировать легче, чем взрослых. В случае крупных животных с массивными костями, например при работе с синим марлином (*Makaira nigricans*), подобраться к структурам, локализованным в черепе, проще всего, производя разрезы стеклянным ножом вдоль краниальных швов и уже отдельно препарируя полученные кости черепной коробки. Чтобы отделить твердые оболочки мозга черепах и китообразных, трепанацию черепа нужно проводить с помощью деревянного молотка или тисков с деревянными губами (гл. 21 и 24). Подобная технология эффективна, но создает дополнительные трудности при точной локализации и идентификации содержащих магнетит структур.

После того как образцы ткани приготовлены и промыты в дистиллированной воде, представляют интерес некоторые их магнитные характеристики: естественная остаточная намагниченность (NRM), остаточная намагниченность при изотермическом насыщении (sIRM) и скорость намагничивания или размагничивания при наложении постепенно возрастающего упорядочивающего или разупорядочивающего поля. Образец ткани перед измерением должен быть заморожен, чтобы иммобилизовать все присутствующие в нем мелкие магнитные частицы. В противном случае в магнитометре в отсутствие внешнего поля ориентация всех магнитных моментов частиц, суспендированных в вязкой среде, усредняется при броуновском движении, и суммарный магнитный момент будет равен нулю.

Простого замораживания образца достаточно только для измерения его NRM. Определение прочих магнитных характеристик требует намагничивания образца перед измерением. Для намагничивания пробы до sIRM желательно поместить ее в сильное однородное поле величиной не менее 300 мТл. В своих ранних работах мы пытались сделать это с помощью кобальт-самариевого магнита. К сожалению, оказалось, что из-за быстрого падения напряженности поля с увеличением расстояния до магнита этим методом трудно добиться намагничивания больших образцов. Из-за неоднородности намагничивания можно получить заниженную оценку количества магнитного материала, и как следствие этого - не заметить потенциально важные магнитные структуры. Соленоид с воздушным сердечником позволяет создавать однородное поле с индукцией до нескольких тесла, и поэтому он вполне пригоден для однородного намагничивания образцов при измерениях в магнитометре. С помощью такого соленоида можно также проводить постепенное намагничивание объектов при изучении коэрцитивности (Kirschvink, 1983).

При выборе держателя проб для магнитометрических экспериментов необходима большая осторожность. Трубки из майлара, стекла или полиэтилена, обычно используемые при палеомагнитных исследованиях, неплохо зарекомендовали себя и в биомагнитных исследованиях, хотя они могут искажать магнитный момент образца и вносить вклад в фоновый шум магнитометра. Кроме того, в сильных магнитных полях эти трубки могут приобретать собственный магнитный момент, поэтому образцы необходимо намагничивать отдельно от держателей, а затем устанавливать для измерения. Это создает дополнительные трудности при повторных измерениях, так как нелегко сохранять ориентацию образца по отношению к соленоиду и катушке детектора магнитометра.

Мы разработали два простых метода помещения образцов в держатель при сохранении постоянной ориентации образца относительно осей соленоидов и катушек магнитометра. Намагниченный замороженный образец можно прикрепить к смоченному концу белой нитки и опустить вертикально в магнитометр. Тщательно отмытая хлопчатобумажная нитка не имеет NRM и может использоваться при повторных измерениях, например для размагничивания в переменном поле. Однако даже «чистые» нитки иногда после экспозиции в сильных полях приобретают магнитный момент. Следовательно для целей быстрого намагничивания необходим другой метод погружения образца в магнитометр. Мы нашли, что более подходящим является держатель в виде крючка из тонкого кварцевого волокна. Крючок втыкают в незамороженный образец и оставляют в нем на протяжении всех измерений. С помощью этих приспособлений, а также импульсного соленоида или соленоида переменного поля с воздушным сердечником (смонтированными вместе с магнитометром в единую установку) нам удалось автоматизировать наши эксперименты и свести до минимума время, затрачиваемое на закрепление образцов при повторных измерениях. Контрольные эксперименты с крючком из кварцевого стекла, вмороженным в кубик льда, показали, что кварцевое волокно не обладает естественным магнитным моментом и не намагничивается даже в сильных полях. Такие волокна неудобны лишь тем, что они очень хрупкие и легко ломаются.

Для идентификации и описания свойств биогенного магнетита могут быть приспособлены несколько используемых в палеомагнитных исследованиях методик. Наиболее важная из них - определение спектра коэрцитивных сил частиц, содержащихся в ткани. Коэрцитивная сила части-

цы магнетита – это минимальная напряженность внешнего магнитного поля, необходимая для изменения вектора момента частицы из стабильной ориентации вдоль одной длинной оси кристалла в стабильную ориентацию вдоль другой оси. Диапазон напряженностей поля, при которых удается намагнитить или размагнитить образец, зависит от коэрцитивных сил частиц, содержащихся в этом образце. Поэтому по спектру коэрцитивных сил можно исключить вклад в остаточную намагниченность целого ряда минералов, например гематита и гётита, и в чистом виде получить информацию о размерах и форме всех имеющихся в пробе фракций магнетита.

Для определения спектра коэрцитивных сил частиц в пробе применяются две методики: постепенное искусственное намагничивание и размагничивание в переменном поле. Внешнее поле B будет изменять магнитные моменты частиц магнетита с коэрцитивными силами меньше чем $B \cdot \cos\theta$, где θ – угол между направлениями вектора момента частицы и вектора приложенного поля. В экспериментах с искусственным намагничиванием при постепенном увеличении напряженности поля происходит согласование направлений вектора магнитных моментов частиц в образце. В случае размагничивания в переменном поле при наложении синусоидального поля с медленно убывающей амплитудой ориентация моментов частиц, имеющих коэрцитивную силу меньше, чем максимальная (пиковая) напряженность приложенного поля, разупорядочивается и становится случайной. Несмотря на то что повторение подобных экспериментов несколько облегчается благодаря применению описанных выше методических подходов с нитью или кварцевым волокном, они не позволяют скорректировать влияние угла между направлением осей кристаллов и вектором приложенного поля и дают завышенную оценку коэрцитивных сил частиц. Но для отделения однодоменных кристаллов магнетита от многодоменных частиц или таких минералов с высокой коэрцитивностью, как гематит, этой ошибкой можно пренебречь, т. е. появление остаточной намагниченности в полях с индукцией меньше 20 мТл или больше 300 мТл указывает на присутствие в образце магнитных загрязнений.

Изобразив на одном графике результаты экспериментов по искусственному намагничиванию в переменном поле, можно получить довольно полную информацию о природе магнитных частиц. Для однодоменных кристаллов – наиболее вероятных кандидатов на участие в магниторецепции – намагничивание и размагничивание происходит в относительно узком диапазоне величин приложенного поля. В тех случаях, когда все частицы имеют размеры одиночных доменов и однородно распределены по объему образца, две кривые представляют собой зеркальные отражения друг друга при одних и тех же напряженностях внешнего поля. Если кристаллы расположены достаточно близко друг к другу и могут взаимодействовать между собой, то приобретение остаточной намагниченности затрудняется, а размагничивание переменным полем облегчается (Cisowski, 1981). Таким образом, асимметрия этих

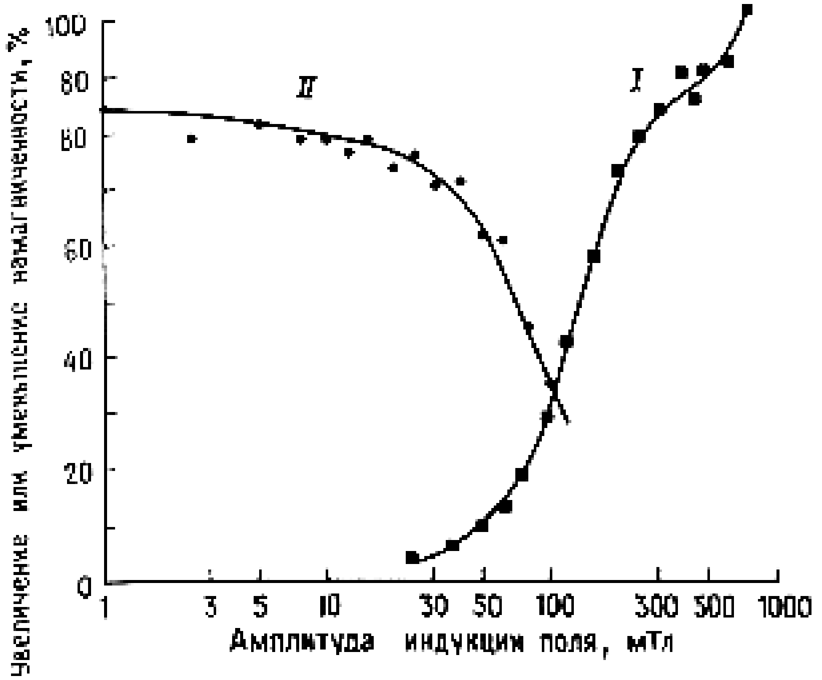


Рис. 5.1. Сравнение результатов экспериментов по искусственному намагничиванию (I) и размагничиванию в переменном поле (II) препаратов ткани из области решетчатой кости черепа человека. 100%-ный уровень соответствует насыщению намагничивания, нулевой – естественной остаточности намагниченности препарата. Препараты предоставлены Р. Р. Бейкером (отделение зоологии Манчестерского университета).

кривых относительно точки 50%-ной намагниченности указывает на степень взаимодействия частиц.

На рис. 5.1 показан пример использования наведения IRM для обнаружения магнитных загрязнений с высокой коэрцитивной силой в препарате ткани из области решетчатой кости черепа человека. В процессе приготовления этого образца мы считали, что препарирование велось с помощью немагнитных инструментов. Однако оказалось, что препарат намагничен гораздо сильнее, чем любой другой исследованный нами биологический объект (магнитный момент $> 10^4$ пА·м^2). Кривая искусственного намагничивания показала, что в нем присутствует не только магнетит, поскольку IRM не достигала насыщения при 300 мТл и продолжала увеличиваться вплоть до полей с индукцией 800 мТл. Кривая размагничивания переменным полем также показала необычайную стабильность содержащегося в препарате магнитного материала. Ткань сохраняла намагниченность даже при амплитуде переменного поля 100 мТл – верхнем пределе по полю для нашей установки. Из приведенных данных можно заключить, что этот препарат ткани содержит высококоэрцитивные магнитные загрязнения. При проверке Бейкер (кафедра зоологии Манчестерского университета, личное сообщение, 1982) выяснил, что ассистент по небрежности подрезал образец ткани металлической пилкой. Поэтому доказать, исходя из полученных данных, что биогенные магнитные частицы, содержащиеся в этом образце,

представляют собой именно тот магнетит, который используется в магниторецепции, не представляется возможным.

Там, где позволяет оборудование, для идентификации и определения характеристик биологического магнетита оказываются весьма полезными еще несколько методов. Вид минерала можно выяснить по его температуре Кюри. Эту методику использовали для определения присутствия магнетита у голубей и пчел (Gould et al., 1978; Walcott et al., 1979). Потерю IRM при нагревании выше изотропной точки магнетита использовали для идентификации многодоменных частиц из тканей тихоокеанского полосатого дельфина (Zoeger et al., 1981). Поскольку данная методика позволяет различать однодоменные и многодоменные кристаллы, она потенциально очень удобна для выявления загрязнений биологических препаратов. И наконец, наличие суперпарамагнитных кристаллов можно доказать с помощью непрерывной регистрации температурной зависимости остаточного момента образца при его нагревании от температуры жидкого азота (77 К) до комнатной (293–298 К). Замораживание препаратов до температуры жидкого азота сдвигает границу между однодоменным и суперпарамагнитным поведением в сторону более мелких частиц. Поэтому при нагревании кристаллов до температуры перехода однодоменной частицы в суперпарамагнитное состояние остаточная намагниченность будет утрачиваться. Этот переход сопровождается падением общего магнитного момента, а температура, при которой он происходит, указывает на приблизительные размеры кристаллов. С помощью подобного эксперимента было показано наличие более 10^8 таких частиц размером 30–35 нм у пчел (Kirschvink, Gould, 1981) и у одного из видов хитонов (Kirschvink, Lowenstam, 1979).

3. Выделение и характеристика биогенного магнетита

Используя описанные выше общие магнитные свойства препаратов из биологических объектов, можно узнать многое о природе и структуре их магнитного материала. Однако по возможности необходимо выделять этот материал в чистом виде и, применяя широкий арсенал методов, исследовать природу и свойства непосредственно экстрагированного магнитного материала. Если удается добыть достаточное для анализа количество исходного материала, необходимо прежде всего точно выявить участки с максимальной концентрацией магнетита. С помощью магнитометрических методов такая процедура была проделана для желтоперого тунца *Thunnus albacares* (Walker, Dizon, 1981; гл. 20). Рыбу тщательно препарировали до тех пор, пока не были надежно локализованы ткани, имеющие высокую остаточную намагниченность. Нам удалось идентифицировать одну специфическую и относительно небольшую структуру – боковую решетчатую кость, – которая всегда была намагничена как у тунца, так и у всех остальных изученных впоследствии

видов рыб. В наших экспериментах было показано, что весь магнетит, содержащийся в этой ткани, сконцентрирован в полости внутри решетчатой кости.

У других позвоночных животных магнетит, вероятнее всего, локализован в твердой оболочке мозга (гл. 21, 24) или, как у рыб, в каком-то участке черепа (Mather, Baker, 1981; Baker et al., 1983; гл. 25, 26). У черепах и китообразных при тщательном препарировании твердой оболочки было обнаружено, что магнитный материал находится в основном в ее передней части. У зеленой черепахи *Chelonia mydas* концентрация магнетита в этих участках оказалась достаточной для его успешного выделения (гл. 21).

У беспозвоночных ситуация менее однозначна. На основании магнитометрических данных и измерений коэрцитивности было показано, что у пчел магнетит или магнитный материал локализован в брюшном отделе (Gould et al., 1978), а у бабочек данаид – в голове и груди (Jones, MacFadden, 1982). Вполне вероятно, что магнетит может быть найден и у других представителей беспозвоночных. А коль скоро легкодоступные содержащие магнетит структуры удается идентифицировать, то в основном более мелкие размеры беспозвоночных животных по сравнению с позвоночными делают их гораздо более удобным объектом для работ по экстракции магнетита.

После идентификации магнитных структур остается лишь отпрепарировать их и собрать вместе для экстракции магнетита. На этой стадии нам удавалось обрабатывать одновременно препараты из пяти желтоперых тунцов. Полученные образцы размельчали в небольшом количестве дистиллированной воды в стеклянном гомогенизаторе или в пробирке с помощью немагнитного пестика. При использовании препаратов тунца в суспензии появлялся жир и капли масла. Для их удаления к суспензии добавляли безводный эфир и сильно взбалтывали. После разделения водной и эфирной фаз эфир декантировали. Эту процедуру повторяли до тех пор, пока водная фаза не становилась чистой.

После экстракции эфиром суспензию центрифугировали, супернатант сливали, а к осадку добавляли 5%-ный раствор гипохлорита (коммерческий отбеливатель), профильтрованный через миллипоровый фильтр. Смесь центрифугировали, периодически заменяя раствор гипохлорита до тех пор, пока ткань не растворялась полностью или не переставала больше растворяться. После этого суспензию снова центрифугировали, сливали супернатант и заливали осадок дистиллированной водой. Процедуру промывания повторяли по крайней мере пять раз. После такой отмывки ткани тунца остается белый осадок, содержащий магнитный материал. Обработка осадка забуференным раствором ЭДТА, pH 7,1, по схеме, аналогичной обработке гипохлоритом, приводила к высвобождению из осадка кристаллов, которые можно отделить от осадка с помощью магнита под препаровальной лупой.

Чтобы отобрать для анализа магнитные частицы, мы подносили кобальт-самариевый магнит к боковой стенке пробирки с суспензией, а

затем отбирали частицы пипеткой на покровное стекло с клеем на основе ксилола. Вода испарялась, а на покровное стекло наслаивали второй слой клея. Таким образом, кристаллы оказывались упакованными в своеобразный сэндвич, который можно было разрезать, отделять от стекла и помещать в рентгеновскую мини-камеру Дебая – Шеррера. Для электронно-микроскопического анализа мы отбирали кристаллы из пробирки на чистые покровные стекла, высушивали и переносили на стекла с нанесенным на них слоем эпоксидной смолы. После затвердения смолы остается лишь отполировать кристаллы и напылить на них углерод. Аналогичным образом агрегаты частиц помещали на пробки и готовили препараты для сканирующей электронной микроскопии (гл. 21).

Кристаллы экспонировали под Мо-K_{α}-рентгеновским излучением (48–72 ч) в мини-камере Дебая – Шеррера. Проявление пленки и обработку рентгенограмм проводили по стандартной методике (гл. 20, 21). Электронно-микроскопический анализ сложнее рентгеновского. Он позволяет определять элементный состав минералов и оценивать чистоту и происхождение кристаллов магнетита. Предварительное изучение кристаллов методом энергодисперсионного рентгеновского анализа дает соответствующую точку отсчета, поскольку выявляет все имеющиеся элементы и их относительные концентрации в каждой пробе (гл. 21). Для количественного анализа выбирали ключевые элементы. При исследовании тунца и черепахи мы проводили анализ на оксиды железа. В качестве образца сравнения использовали стандартный магнетит. Мы определяли также содержание оксидов редкоземельных металлов, таких как титан и марганец, которые обычно служат индикаторами загрязнений геологическим магнетитом (гл. 20, 21). Кроме того, для выяснения, насколько прочно в препаратах тунца связан с агрегатами частиц осадок, остающийся после обработки гипохлоритом, мы проводили анализ на содержание кальция.

Изучение образцов магнетита из зеленой черепахи и тунца показало, что они почти не содержат примесных оксидов (помимо оксидов железа). Хотя используемый для количественных исследований стандарт (NMNH 11487) представлял собой необычайно чистый магнетит геологического происхождения (М.О. Гарсия, Институт геофизики Гавайского университета, личное сообщение), в отличие от биогенного магнетита в нем обнаружились заметные количества оксидов редкоземельных металлов – титана и хрома (гл. 20, 21). Если учесть отсутствие никеля в препаратах из черепах (гл. 21), а также очень небольшие количества марганца в магнетитах из тунца и черепах, то эти данные могут служить строгим доказательством того, что выделенный магнетит по своему происхождению не является ни синтетическим, ни геологическим.

Слишком малые количества материала, получаемые с помощью описанной выше процедуры, не позволяют использовать развиваемый Тоу (гл. 6) подход для приготовления кристаллов для просвечивающей электронной микроскопии. Чтобы как-то компенсировать это ограничение, Чанг (отделение геологии и планетарных наук, Калифорнийский технологический институт, личное сообщение) разработал метод получения диспергированных кристаллов. Агрегированные кристаллы помещают на покрытую углеродом медную сетку и распыляют в переменном магнитном поле (100 мТл). Затем сетки высушивают на воздухе и готовят для просвечивающей электронной микроскопии (гл. 20).

Экстракция магнитного материала позволяет сразу же получить большое количество информации, помогающей в его идентификации. По цвету частиц, выделенных из тунца и черепах, например, уже можно исключить маггемит. Маггемит по своим магнитным свойствам близок к магнетиту, и поэтому, скажем, при изучении коэрцитивности нельзя сделать выбор между этими минералами. Однако для того чтобы однозначно идентифицировать кристаллы, доказать их биологическое происхождение и исключить возможность загрязнения в процессе препарирования и экстракции материала, необходимы детальные исследования. Например, экстрагированные из желтоперого тунца и зеленой черепахи частицы были идентифицированы методом дифракции рентгеновских лучей как магнетит (гл. 21, 20). В то же время для магнитного материала из опухолей, содержащих, как считалось, однодоменные кристаллы магнетита, рентгенография показала наличие природного железа и минерала, который может быть магнетитом или маггемитом (рис. 5.2). Исходя из цвета кристаллов, маггемит был исключен. Железо

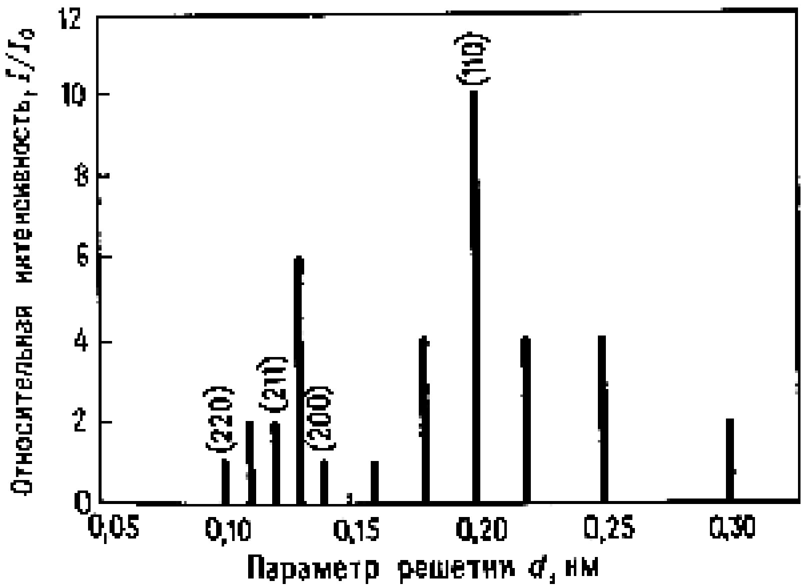


Рис. 5.2. Данные рентгенографического анализа магнитных частиц из опухолей мышей. Препараты предоставлены Ф.Л. Табра и С. Баткином (медицинское училище им. Дж. А Бернса, Гавайский университет). Длины вертикальных линий соответствуют относительным интенсивностям линий на дифракционной картине. Числа в скобках относятся к линиям, связанным с металлическим железом, и обозначают плоскость симметрии кристалла. Линии, имеющие параметр решетки d 0,30 и 0,25 нм, могут быть обусловлены магнетитом или маггемитом. Источники остальных линий на рентгенограмме неизвестны.

же в основном представляет собой загрязнение, источник которого пока неизвестен.

Дифракционные картины не позволяют окончательно доказать происхождение частиц магнетита, выделенных из тканей; в их интерпретации необходима определенная осторожность. Мелкозернистые порошки чистого магнетита, например такие, которые предположительно принимают участие в магниторецепции, будут давать идеальные, четкие и однозначные дифракционные картины. Размытость пятен или линий на картинах дифракции рентгеновских лучей и электронов может возникать из-за неоднородности образца. Тоу и Менч (Towe, Moench, 1981) предполагают, что размытость картины дифракции электронов на однодоменных кристаллах магнетита, выделенных из магниточувствительных бактерий, обусловлена дефектами в кристаллической структуре. Многодоменные частицы также могут давать размытую дифракционную картину. Поэтому необходимо сочетать идентификацию частиц с определением их доменного состояния. Электронографию и измерение размеров и формы изолированных кристаллов можно проводить на одних и тех же образцах, помещенных на медные сетки. Таким образом, хотя дифракция электронов – более трудоемкая методика, чем рентгенография, именно она, в сочетании с размерами и морфологией, позволяет делать окончательные выводы о происхождении частиц (гл. 6, 20).

4. Обсуждение

Разработанные магнитометрические методы позволяют выявлять и характеризовать объемные свойства магнетита в организме. В настоящее время стало возможным анализировать поликристаллические агрегаты и изолированные кристаллы экстрагированного из магнитных тканей магнетита. Эти исследования позволяют сделать важный вывод: если определить наличие в организме магнитного материала относительно легко, то выявить его происхождение и функцию гораздо труднее. Мы попытались заложить теоретический базис для выяснения, какая форма биогенного магнетита могла бы использоваться для магниторецепции, а также привели экспериментальные доказательства в пользу предложенной теории. Это позволило рассмотреть целый ряд гипотез об организации магниторецепторных органелл, основанных на магнетите (Kirschvink, Gould, 1981; Kirschvink et al., в печати; гл. 11, 20), что в свою очередь открывает новые возможности для проверки гипотезы ферромагнитной магниторецепции.

Важный результат этой работы – понимание того, что совершенно необходимо на всех стадиях исследования 1) проверять образцы на наличие примесей и 2) следить за согласованностью результатов, полученных различными методами. Убедительной иллюстрацией возможного влияния загрязнителей на результаты магнитометрических измерений могут служить различия между валовыми магнитными свойствами твердой оболочки мозга полосатого тихоокеанского дельфина (Zoeger et al., 1981), препарата из мозга человека (рис. 5.1) и решетчатой кости пелагической рыбы (гл. 20). Предварительные исследования показали, что магнитные частицы, экстрагированные из опухолей мышей, вероятнее всего, содержат однодоменный магнетит (Kirschvink et al., 1982). В то же время при рентгенографии магнитных частиц из опухоли одного типа было обнаружено чистое железо и, возможно, магнетит. Присутствие в пробе железа противоречит магнитометрическим данным и может быть обусловлено загрязнением образца в процессе экстракции. Имея все это в виду, необходимо доказывать биогенную природу магнитного материала, находящегося в ткани и экстрагированного из нее, независимыми методами.

По данным просвечивающей электронной микроскопии, кристаллы биогенного магнетита в отличие от синтетического и геологического имеют неоктаэдрическую геометрию (Towe, Moench, 1981; Matsuda et al., 1983; гл. 20). Это свойство несущественно для гипотезы магниторецепции, обусловленной магнетитом, но позволяет точно определять происхождение минерала. Из этого факта следует, что различия в свойствах биогенного магнетита возникают в процессе биоминерализации. Вероятно, можно ожидать различий и в химическом составе биогенного и геологического магнетитов. Потенциально важной характеристикой является соотношение изотопов кислорода в биогенном и небиогенном магнетитах (гл. 1). Пока технология и имеющиеся в наличии количества материала не позволяют определять содержание изотопов кислорода в биогенных магнетитах. Существующие в настоящее время масс-спектрометры требуют как минимум около 20 мкг образца, что эквивалентно количественной экстракции магнетита из решетчатых костей по крайней мере 100 особей желтоперого тунца. Избежать загрязнений при такой крупномасштабной экстракции практически невозможно. Для ионного микроанализа могут потребоваться меньшие количества образца, чем для масс-спектроскопии, и мы пытаемся приспособить эту методику для исследования биогенных магнетитов.

С помощью этих методов можно разработать способ выявления биогенного магнетита, потенциально пригодного для использования в магниторецепции. Это не означает, что гипотеза магниторецепции, обусловленной магнетитом, доказана. Тем не менее подход, позволяющий распознавать пригодный для магниторецепции магнетит, может оказаться полезным для предсказания существенных свойств других обнаруженных у многоклеточных включений магнетита. Это весьма важно, поскольку данные включения могут быть предшественниками рецепторного магнетита (Kirschvink, Gould, 1981; гл. 20), а также потому, что необходимо уметь отличать эти две формы друг от друга и от экзогенных загрязнений.

Согласно простейшей гипотезе, биогенный магнетит представляет собой некую форму запасания железа или же он откладывается при патологических процессах (Lowenstam, Weiner, 1983; гл. 20). В пользу данной гипотезы свидетельствует тот факт, что аномальные включения

магнитного материала чаще всего находят у крупных и старых животных. (Дж. Г. Мэзер, кафедра зоологии Манчестерского университета, личное сообщение, 1981; Пэрри, неопубликованные данные; Уокер, неопубликованные данные). Размер и форма кристаллов в этих случаях менее важны, чем для магнетита, используемого в магниторецепции. Вероятно, осаждение минералов происходит ферментативным путем, поэтому скорее всего эти включения должны также отличаться по химическому составу. Изучение процесса биоминерализации запасов или минералов, образующихся при патологии, может способствовать предсказанию вероятных свойств биогенного магнетита, не используемого в магниторецепции, а также выяснению мест преимущественной локализации этих включений и их последующему обнаружению.

Изучая магнетит, не следует забывать также и о других интересных формах биогенных магнитных минералов. За последние годы список этих минералов существенно пополнился (Lowenstam, 1981; гл. 1). Поэтому при проведении биомагнитных исследований мы должны быть готовы применить соответствующие подходы, чтобы суметь правильно выявить и охарактеризовать все формы магнитных минералов. Для детектирования этих минералов пригодно обычное магнитометрическое оборудование, широко используемое в палеомагнитных исследованиях. Получение гидролитических ферментов, специфичных к определенным компонентам магнитных тканей, возможно, позволит выделять магнитные минералы в нативном виде. В последние год или два значительное развитие получили специфические методы обнаружения, выделения и изучения свойств биогенного магнетита. Можно ожидать дальнейшего ускорения этого развития, поскольку интерес к процессам биоминерализации продолжает расти. Надеемся, что данная глава послужит стимулом к разработке новых, более эффективных подходов в этой области.

5. Краткое содержание

Обнаруживаемый в клетках и тканях магнетит представляет собой часть недавно описанного класса биогенных минералов. Этот магнетит рассматривается в качестве возможной материальной основы магниторецепции у живых организмов. Само по себе обнаружение магнитного материала мало что дает для понимания как процесса биоминерализации, так и роли этого материала в магниторецепции. Для дальнейшего прогресса необходима разработка методик, позволяющих различить магнитные загрязнения и биологические отложения в тканях. И лишь после этого можно приступить к проверке гипотез о природе и роли магнитного материала.

Данная глава посвящена специальной форме магнетита, которая, как предполагают, используется для магниторецепции. Кроме того, мы попытались здесь установить, чем этот магнетит отличается от геологического и синтетического. Описаны методы детектирования и определения магнитных свойств материала, позволяющие отличать его от загрязнений. Аналогичный подход использован для методики выделения, идентификации и описания свойств индивидуальных кристаллов и кристаллических агрегатов магнетита. На примерах показано, как с помощью магнитометрических, препаративных и гистологических тестов идентифицировать отличные от магнетита формы магнитного материала, которые могли бы участвовать в магниторецепции.

Исследования показали, что возникновение ключевых отличительных особенностей биогенного магнетита обусловлено процессом биоминерализации. Различить биологический и небиологический магнетиты можно с помощью как инвазивных, так и неинвазивных методов, тогда как одновременное применение обоих подходов позволяет получить значительно больше информации о природе магнитного материала, а также существенно повысить достоверность полученных выводов. Рассмотренные в данной главе подходы могут оказаться весьма плодотворными при изучении других магнитных минералов с иными физиологическими функциями в живых организмах.

Благодарности

Мы выражаем свою глубокую признательность Чарльзу Е. Хелсли, Барбаре Х. Китинг и Ли Чун Мину из Института геофизики Гавайского университета, любезно предоставивших в наше распоряжение оборудование палеомагнитной лаборатории, а также за помощь в рентгенографическом анализе. В магнитометрических исследованиях в Калифорнийском технологическом институте нам помогала Карла А. Петерсон. Средства на исследования и оборудование были великодушно предоставлены Гонолулской лабораторией юго-западного отделения Национальной службы морского рыболовства, Национального управления по исследованию океанов и атмосферы. Частично эта работа финансировалась Центром Восток – Запад (Гонолулу), а также фирмой Sigma. Данная глава представляет собой отчет № 3939 from the Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology.

Литература

Baker R. R., Mather J. G., Kennaugh J. H. (1983). Magnetic bones in human sinuses, Nature, 301, 78–80.

Cisowski S. (1981). Interacting vs. non-interacting single-domain behavior in natural and synthetic samples, Phys. Earth Planet. Inter., 26, 56–62.

Gould J. L., Kirschvink J. L., Deffeyes K. S. (1978). Bees have magnetic remanence, Science, 201, 1026–1028.

Jones D. S., MacFadden B. J. (1982). Induced magnetization in the monarch butterfly, *Danaus plexippus* (Insecta, Lepidoptera), J. Exp. Biol., 96, 1–9.

Kirschvink J. L. (1981). Ferromagnetic crystals (magnetite?) in human tissue, J. Exp. Biol., 92, 333–335.

Kirschvink J. L., 1983. Biogenic ferrimagnetism: A new biomagnetism. In: Biomagnetism: An Interdisciplinary Approach (S.J. Williamson, G.-L. Romani, L. Kaufman, and I. Modena, eds.), Plenum Press, New York, pp. 501–532.

Kirschvink J., Gould J. L. (1981). Biogenic magnetite as a basic for magnetic field detection in animals, BioSystems, **13**, 181–201.
Kirschvink J. L., Lowenstam H. A. (1979). Mineralization and magnetization of chiton teeth: Paleomagnetic, sedimentologic, and biologic implications of organic magnetite, Earth Planet. Sci. Lett., **44**, 193–204.
Kirschvink J. L., Tabrah F. L., Batkin S. (1982). Ferromagnetism in two mouse tumours, J. Exp. Biol., **101**, 321–326.
Kirschvink J. L., Walker M. M., Chang S.-B. R., Dizon A. E., Peterson K. A. Chains of single-domain magnetite particles in chinook salmon, *Oncorhynchus tshawytscha*, J. Comp. Physiol, in press.
Kuterbach D. A., Walcott B., Reeder R. J., Frankel R. B. (1982). Iron-containing cells in the honey bee (*Apis mellifera*), Science, **218**, 695–697.
Lowenstam H. A. (1962). Magnetite in denticle capping in recent chitons (Polyplacophora), Geol. Soc. Am. Bull., **73**, 435–438.
Lowenstam H. A. (1981). Minerals formed by organisms, Science, **211**, 1126–1131.
Lowenstam H. A., Weiner S., 1983. Mineralization by organisms and the evolution of biomineralization. In: Biomineralization and Biological Metal Accumulation (P. Westbroek and E. W. de Jong, eds.), Reidel, Dordrecht, pp. 191–203.
McElhinny M. W., 1973. Paleomagnetism and Plate Tectonics, Cambridge University Press, London.
Mather J. G., Baker R. R. (1981). Magnetic sense of direction in woodmice for route-based navigation, Nature, **291**, 152–155.
Matsuda T., Endo J., Osakabe N., Tonomura A., Arii T. (1983). Morphology and structure of biogenic magnetite particles, Nature, **302**, 411–412.
Presti D., Pettigrew J. D. (1980). Ferromagnetic coupling to muscle receptors as a basis for geomagnetic field sensitivity in animals, Nature, **285**, 99–101.
Towe K. M., Moench T. T. (1981). Electron-optical chracterization of bacterial magnetite, Earth Planet. Sci. Lett., **52**, 213–220.
Walcott C., Gould J. L., Kirschvink J. L. (1979). Pigeons have magnets, Science, **205**, 1027–1029.
Walker M. M., Dizon A. E. (1981). Identification of magnetite in tuna, Eos, **62**, 850.
Zoeger J., Dunn J. R., Fuller M. (1981). Magnetic material in the head of the common Pacific dolphin, Science, **213**, 892–894.

Глава 6

ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ БИОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ МЕТОДАМИ ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ И ЭЛЕКТРОННОЙ ДИФРАКЦИИ; НЕКОТОРЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Кеннет М. Тоу[1]

1. Введение

Детальное изучение частиц с тонкой структурой часто лучше всего удается методами электронной микроскопии и (там, где это возможно) электронной дифракции. Задачей этой главы является описание и обсуждение некоторых полезных методов выделения, идентификации и изучения свойств минеральных частиц биогенного происхождения с использованием приемов, разработанных для просвечивающей электронной микроскопии. Эти методы полезны для определения размера, формы и минерального состава как кристаллических, так и аморфных материалов и в целом применимы (с небольшими модификациями) и к магнитным, и к немагнитным материалам. Из руководств по электронной микроскопии очевидно, что существует много таких методов. В данной главе изложены подходы, которые мы успешно применяли в самых разных случаях. Возможно, опытный специалист по просвечивающей электронной микроскопии отвергнет многое из того, о чем будет идти речь, считая, что методика, которой пользуется он, лучше; эта глава написана не для него. Содержание главы не претендует на полноту и строгость: в ней была поставлена цель систематизировать различные соображения, советы и рекомендации, которые могут оказаться полезными для исследователей, вообще не знакомых с просвечивающей электронной микроскопией и электронной дифракцией и с их применением для анализа минеральных образцов.

Поскольку каждый образец имеет свои особенности, не существует и универсальной методологии для их исследования. Хочется предостеречь читателя от соблазна использовать это или любое другое руководство как своего рода «поваренную книгу». Для того чтобы успешно применять просвечивающую электронную микроскопию, нужно учитывать индивидуальные особенности исследуемых образцов. В этом деле

[1] *Kenneth M. Towe*, Department of Paleobiology, Smithsonian Institution, Washington, D. C. 20560.

нелегко осуществить технологический подход, поэтому методические приемы являются в равной мере и наукой и искусством.

2. Подготовка образцов для электронной микроскопии

Прежде всего необходимо отметить, что, хотя работа электронно-оптической аппаратуры является важной, залогом успеха электронно-микроскопического исследования служит хорошая подготовка образца. Самое лучшее оборудование в мире не сможет компенсировать плохое изготовление образца; если же образец для электронного микроскопа был подготовлен хорошо, это означает, что больше половины дела уже сделано.

2.1. Предварительное исследование образца

Казалось бы, прежде чем подготавливать образец для электронной микроскопии, его надо предварительно всесторонне исследовать, но обычно обращают внимание лишь на те особенности образца, которые могут оказаться существенными для применяемой методики, или же интересуются тем, что, может быть, окажется важным позднее. Исследователю необходимо затратить время на изучение объекта при меньшем увеличении, прежде чем он столкнется лицом к лицу с проблемой поиска «иголки в стоге сена», которая часто возникает при просвечивающей электронной микроскопии с большим увеличением. Итак, вначале следует проанализировать физические и химические свойства каждого образца и ответить на ряд вопросов. Ниже приводится список этих вопросов, хотя известно, что на многие из них нельзя ответить даже в идеальном случае.

1. Можно ли с помощью светового микроскопа различать минеральные компоненты? Если да, то почти наверняка их слои слишком толстые, чтобы пропускать электроны, и использование просвечивающей электронной микроскопии может быть даже ненужным.

2. Не присутствует ли в образце несколько неорганических компонентов? Если это так, то могут возникнуть трудности при их различении в черно-белом мире электронной микроскопии. Неясности могут появляться и при анализе картин электронной дифракции.

3. Уверены ли вы в том, что имеющегося у вас материала достаточно для проведения более чем одного анализа? Другими словами, не окажется ли анализ образца методом просвечивающей электронной микроскопии однократной операцией? Если это так, то, по-видимому, не имеет смысла использовать этот метод, пока не появится больше данных о природе образца, полученных иным путем.

4. Говорят ли другие аналитические методы что-либо о минеральном составе или величине частиц, что может оказаться полезным при

подготовке образца? Например, свидетельствуют ли данные дифракции рентгеновских лучей о том, что исследуемые компоненты являются кристаллическими, но с очень малой величиной кристаллов, т. е. обнаруживаются ли в картине Дебая–Шеррера признаки уширения линий?

5. Были ли проведены поиски посторонних загрязняющих частиц и были ли они удалены из образца, чтобы избежать возможности ошибочного толкования результатов?

Ответы на эти и связанные с ними вопросы заложат основы планирования подготовки образца для просвечивающей электронной микроскопии. Чем больше известно об образце заранее, тем легче и продуктивнее будет, по-видимому, электронно-микроскопическое исследование.

2.2. Выделение и разделение минеральных фаз

Если предварительное исследование образца указывает на возможность выделения неорганических фаз, то первым этапом приготовления пробы мелкодисперсного материала является удаление из организма минеральных частиц и возможно более полная очистка их от налипшего органического материала. Вообще если можно как-то отделить минеральные фазы от посторонней ткани путем препарирования, то полезно проделать это. Если минеральный материал встречается в макроскопической концентрированной форме, как, например, в случае магнетита зубцов у некоторых морских хитонов, то этот минерал сперва можно выделить физическими и механическими способами. Полезно провести тщательное препарирование с помощью пинцетов и игл из немагнитного материала, а также сбор образца при помощи тонкой кисточки из верблюжьей шерсти.

Однако с рассеянными минеральными частицами, такими как у обладающих магнитотаксисом бактерий, нельзя поступать подобным образом. В этом случае необходима разработка других методик. Оказалось успешным совместное использование двух приемов: химического растворения органического вещества и ультразвуковой обработки раствора для уменьшения агрегации. Обычно используют чистые пробирки емкостью 5 мл от клинической центрифуги. Берут четное количество пробирок с небольшим приблизительно одинаковым количеством изолированных тканей или микроорганизмов. Затем каждую пробирку заполняют примерно на 2/3 имеющимся в продаже хозяйственным отбеливателем (5,25%-ным раствором гипохлорита натрия). Неодинаковое количество жидкости с тканью в пробирках приведет к разбалансировке центрифуги, чего следует избегать. Если образец содержится в одной-единственной пробирке, то для ее уравновешивания нужно взять другую с соответствующим количеством воды. Затем центрифужные пробирки помещают в заполненную водой ванночку ультразвукового вибратора и обрабатывают ультразвуком в течение нескольких минут. Отбеливатель прореагирует с белковоподобным материалом довольно быстро, а с углеводным – либо более медленно, либо вообще не будет

взаимодействовать с ним. Один из способов выделения заключается в том, что образцы оставляют в отбеливателе на несколько часов после предварительной ультразвуковой обработки. Затем помещают пробирки в клиническую центрифугу, и нерастворенный материал отделяют в виде осадка. После того как неорганический материал осажден, к нему добавляют свежий отбеливатель и вновь взбалтывают осадок при помощи ультразвуковой вибрации. Этот процесс повторяют до тех пор, пока бóльшая часть органического вещества не окажется растворенной. Обработанные отбеливателем частицы промывают дистиллированной водой, применяя такое же чередование растворения в воде, осаждения и последующего суспендирования до тех пор, пока отбеливатель не будет в основном удален.

Как и при всякой обработке, здесь возможен ряд осложнений. Во-первых, для улучшения растворения органического вещества нельзя применять нагревание из-за большой вероятности сопутствующих этому изменений минерального состава и(или) кристалличности выделяемого неорганического материала. Во-вторых, продолжительность этапов центрифугирования должна быть достаточной, для того чтобы бóльшая часть даже самых мелких минеральных частичек могла достичь дна пробирки. Это можно грубо оценить, помещая пробирки перед источником света. Если жидкость прозрачна, и эффект Тиндаля не обнаруживается, значит, бóльшая часть материала осаждена. В-третьих, следует учитывать возможность изменения минеральных фаз под действием отбеливателя. Существует потенциальная опасность окисления части восстановленного железа в магнетите, но опыт показал, что это происходит редко. Исследование таких образцов до и после интенсивного воздействия отбеливателя методом дифракции рентгеновских лучей не обнаружило образование новых минеральных фаз. Тем не менее исследователь, возможно, пожелает убедиться сам, что такого рода изменения отсутствуют. И в-четвертых, еще одно предостережение: окисление органического материала хлорным отбеливателем в некоторых случаях может приводить к выделению железа, находящегося в организме в хелатированном или другом неминерализованном состоянии. Это железо может гидролизоваться в дистиллированной воде с образованием коллоидных водных оксидов железа, отсутствующих в обычных условиях. Хотя не зарегистрировано ни одного случая такого артефакта, при любом способе выделения минеральных частиц с использованием окисления органического материала потенциальная возможность такой ошибки не исключена.

Когда минеральный материал выделен и освобожден от органических примесей, он фактически готов для исследования. Поскольку просвечивающая электронная микроскопия имеет определенные ограничения в отношении толщины образца, необходима дальнейшая обработка материала для удаления крупных зерен. Образцы толще ~ 0,1 мкм редко дают в электронном микроскопе что-либо, кроме силуэтного изображения, причем это зависит от среднего атомного числа исследуемых

элементов и их кристаллографического окружения. Поэтому в таком образце можно исследовать только минеральные частицы меньшей величины. Грубозернистые препараты лучше исследовать при помощи сканирующей электронной микроскопии, в отраженном свете или с применением реплик.

2.3. Изготовление подложек для образцов

При исследовании в просвечивающем электронном микроскопе образцы помещают на соответствующие подложки. Обычная процедура, описанная в руководствах, состоит в нанесении капли диспергированных частиц на держатель образца – сетку-подложку или другое какое-либо приспособление с небольшими отверстиями, затянутыми очень тонким бесструктурным и проницаемым для электронов субстратом.

Сетки для образцов весьма различаются по виду металла и величине ячеек. В большинстве случаев для диспергированных частиц подходят медные сетки типа «Афина» диаметром 3 мм, имеющие мелкие ячейки с четкими очертаниями. Достаточной является решетка из 200–300 ячеек. Сетки с крупными ячейками, щелевидные или овальные бленды более пригодны для сверхтонких срезов или реплик, но меньше подходят для диспергированных частиц из-за повышенной вероятности смещения образца и повреждения субстрата в электронном микроскопе.

Каждая сетка должна быть покрыта подложкой. Для этого имеется несколько возможностей, но наиболее распространенной является тонкая коллодиевая (нитроцеллюлозная) пленка, покрытая тонким слоем напыленного углерода.

В большинстве руководств описываются разные способы изготовления таких тонких пленок. Одним из простейших методов достижения однородности тонких пленок является метод капли, растекающейся под действием силы тяжести. По этой методике сначала готовят чистый раствор, содержащий около 1% (по весу) парлодия в амилацетате. Большой стеклянный кристаллизатор заполняют дистиллированной водой, ставят в центре его блок-подставку и кладут на нее медную (или из другого нержавеющего материала) пластинку таким образом, чтобы она находилась под самой поверхностью воды. Затем на пластинку осторожно помещают по отдельности медные сетки. После укладывания всех сеток в кристаллизатор медленно доливают воду до тех пор, пока не образуется мениск. Частицы пыли с поверхности мениска удаляют чистой стеклянной палочкой. На чистую поверхность воды наносят маленькую каплю исходного раствора парлодия. После того как амилацетат улетучится (это должно занимать всего несколько секунд), на поверхности воды остается тонкая пленка пластикового покрытия. Затем воду из кристаллизатора отсасывают при помощи сифона, позволяя пленке осесть на сетках. (В некоторых лабораториях пользуются специальными стеклянными чашками с ниппельным отверстием в основании для удаления воды без отсасывания с помощью сифона.) После того

как воду отсосали, пластинку с покрытыми пленкой сетками осторожно удаляют и высушивают на воздухе в защищенном от пыли месте.

Высушенные на воздухе сетки могут быть использованы как подложки для образцов. Однако для их укрепления и для того чтобы избежать зарядных эффектов в микроскопе, желательно напылить на их поверхность тонкий слой углерода. Тонкую углеродную пленку наносят в высоковакуумной напылительной установке, являющейся стандартной принадлежностью большинства электронно-микроскопических лабораторий. О количестве углерода судят визуально по мере его нанесения. Прежде чем откачать воздух из колоколообразного сосуда вакуумного испарителя, рядом с сетками помещают небольшой кусочек белой глазурированной кафельной плитки, в центр которого наносят каплю масла для диффузионного насоса. При испарении углерод будет оседать на всей поверхности кафеля, не прикрытой масляной каплей, и, следя за интенсивностью окрашивания, экспериментатор может контролировать толщину слоя напыленного углерода. Желательным является слабо-серое окрашивание.

Углеродные пленки (и в меньшей степени пластмассовые) гидрофобны. Это нежелательное свойство затрудняет однородное наслаивание диспергированного материала водных суспензий. Поэтому перед нанесением образца углеродные полимерные подложки необходимо дополнительно обработать. Важность этого этапа в исследованиях с помощью просвечивающей электронной микроскопии тонкодисперсного материала бесспорна. Время, затраченное на придание поверхности сетки гидрофильных свойств, окупается с лихвой.

Различные руководства предлагают множество способов устранения несмачиваемости, вызванной гидрофобностью поверхности. Наиболее чистым и надежным является редко описываемый методический прием ионная очистка в высокочастотном газовом разряде. Лучше всего этот процесс протекает сразу после покрытия сеток углеродом. Если вакуумный испаритель оборудован «ионно-очистным» трансформатором, его включают после прекращения работы диффузионного насоса, когда под колокол проникает немного воздуха, и начинают новый цикл. При отсутствии встроенного трансформатора сходного результата достигают приложением к внешнему вводу колокола управляемой вручную высокочастотной индукционной катушки Тесла. Голубоватый газовый разряд выглядит по-разному в зависимости от степени вакуума. Как и в случае ионизационного счетчика, он будет слабым и при слишком низком, и при слишком высоком вакууме. С помощью метода проб и ошибок исследователь может найти наилучшие условия обработки сеток. Сетки подвергают обработке в течение 30–60 с. После этого они пригодны для использования и могут быть извлечены из прибора. Если сетки не используют в течение примерно недели, то может потребоваться их повторная обработка.

2.4. Нанесение образца на подложку

После того как образец получен в виде водной суспензии, его помещают (в соответствующем количестве) на поверхность сетки для исследования в электронном микроскопе. При этом возникает необходимость в разработке способов удерживания сеток. При использовании пинцета могут возникать осложнения, в особенности в случае магнитных материалов. Лучшим способом является следующий. Сначала на чистое предметное стекло накладывают небольшую полоску двусторонней липкой ленты. Затем отдельные покрытые пленкой и ионизированные опорные сетки прикладывают к самому краю ленты таким образом, чтобы удержать их на месте и в то же время чтобы они были на достаточном расстоянии друг от друга. После этого на сетки можно наносить образцы.

Исследуемый материал должен быть хорошо диспергирован в определенном количестве дистиллированной воды. «Соответствующую» концентрацию определяют экспериментально, визуально оценивая на просвет оптическую плотность раствора в 5-миллилитровой центрифужной пробирке. Если суспензия оказывается слишком светлой, твердые компоненты можно переосадить в клинической центрифуге. Если суспензия выглядит слишком темной, ее можно развести.

Перед нанесением образца на сетку центрифужную пробирку, содержащую образец, следует на короткое время поместить в ультразвуковой диспергатор, чтобы быть уверенным в дезагрегации минеральных частиц. Это может быть особенно важно в случае магнитных частиц, которые имеют тенденцию слипаться и образовывать вытянутые цепочки.

При помощи чистой стеклянной пипетки на ионизированную поверхность сетки наносят небольшую каплю диспергированного материала. Если поверхность достаточно гидрофильна, то маленькая капля будет иметь низкий уплощенный менисковый профиль, если же она гидрофобна, то капля будет высокой. В последнем случае обычно не рекомендуется производить дальнейшие операции, поскольку при высыхании образец распределится по поверхности сетки неравномерно. Частицы будут смещаться к краям сетки или образовывать плотные скопления. Поместите сетки с нанесенным образцом в атмосферу светящегося ионного разряда (разд. 2.3). Если капля приобретает уплощенный профиль, характерный для гидрофильной поверхности, можно дать избытку воды испариться на воздухе или в случае суспензий с высокой концентрацией частиц можно осторожно удалить воду прикладыванием заостренного конца чистой фильтровальной бумаги к краю сетки. При этом капля станет более плоской и равномерно испарится с гидрофильной поверхности, а на сетке останутся хорошо диспергированные частицы. После полного высыхания сетка готова для электронно-микроскопического исследования. Если вода не высыхает равномерно, но быстро и полностью всасывается в фильтровальную бумагу, то это обычно указывает на слишком большую гидрофобность поверхности сетки. В

данном случае продолжать работу не имеет смысла, поскольку на поверхности такой сетки удержится мало частиц, а те, которые сохранятся, будут агрегированы и плохо распределены. Лучше подвергнуть сетки действию светящегося газового разряда и начать все сначала.

Иногда полезен другой способ нанесения образца на сетку, в особенности когда нужно избежать слипания магнитных частиц. (Следует отметить, что если магнитные частицы реагируют с большой скоростью, то они либо слишком сконцентрированы, либо чрезмерно велики для непосредственного изучения с помощью просвечивающего электронного микроскопа; в этом случае необходима дополнительная обработка образца.) Эта методика предусматривает помещение суспензии образца в стеклянный распылитель и – сразу после ультразвукового диспергирования – нанесение на сетки микрокапелек суспензии, которые быстро высыхают. Стеклянные распылители для этой цели можно приобрести через торговые организации, поставляющие оборудование для электронной микроскопии.

2.5. Оттенение и получение реплик

Недостатком просвечивающего электронного микроскопа, позволяющего достигать очень высокого разрешения, является то, что в обычных условиях он не дает легко интерпретируемой картины образца. Современный сканирующий электронный микроскоп в очень большой степени восполнил этот пробел. Он позволяет выявлять трехмерную картину большинства объектов и особенно пригоден для малых и средних увеличений. Однако время от времени появляются работы, в которых очень мелкие частицы коллоидных размеров исследуют на пределе возможностей сканирующего электронного микроскопа. В тех случаях, когда требуются более высокое разрешение и более точная идентификация, может быть полезен просвечивающий электронный микроскоп, если применять метод, известный как оттенение. С помощью этого метода создается впечатление трехмерности изображения.

Методика оттенения детально описана в большинстве публикаций по общим вопросам электронной микроскопии. По существу она включает в себя вакуумное напыление тяжелых металлов (золота, платины, хрома) из точечного источника под углом к поверхности образца, уже высохшего на подложке. Металл, осаждаясь на одной поверхности и образуя тень за другой, создает при наблюдении в электронный микроскоп впечатление глубины. Если известен угол оттенения, то высота оттененного материала может быть вычислена при помощи тригонометрических функций. Когда требуется более точное знание размеров, для определения истинной величины угла оттенения можно использовать внутреннюю калибровку. При этом к суспензии частиц добавляют небольшое количество калибровочных шариков известного размера из полистиролового латекса, по которым считывают угол оттенения. Такие шарики имеются в продаже.

Для образования четких теней и мелкозернистого металлического покрытия необходимо, чтобы до начала напыления металла был достигнут высокий вакуум. Методика оттенения может быть особенно полезна для определения формы и размеров очень тонких чешуек и волокон, которые для улучшения их видимости оттеняют под очень малыми углами. Наблюдение очень мелких частиц (< 100 Å) могут осложнять артефакты, создаваемые зернистостью металла, нечеткостью теней и образованием «шубы». Результаты таких опытов следует оценивать с осторожностью.

Появление новых сканирующих электронных микроскопов с более высоким разрешением привело к тому, что трудный и требующий больших затрат времени метод одноступенчатых реплик, используемый для выявления топографии поверхности, стал считаться едва ли не устаревшим. Хотя с помощью этого метода по-прежнему можно получать контрастные и четкие микрофотографии при высоких увеличениях, его применяют все меньше из-за трудоемкости связанных с ним операций. Кроме того, существует опасность разрушения образца. Совершенно очевидно, что в тех случаях, когда основной целью является получение информации о топографии поверхности, более предпочтителен сканирующий электронный микроскоп. Заслуживает упоминания одно исключение: по-видимому, замораживание–скалывание и замораживание–травление биологической ткани лучше проводить с помощью получения реплик. Тем, кто интересуется этим вопросом подробно, следует обратиться к специальным публикациям.

2.6. Методы подготовки тканей

Исследователю, изучающему связанные с тканью минералы биогенного происхождения in situ с помощью просвечивающего электронного микроскопа, приходится иметь дело с инструкциями, в которых подробно описаны способы подготовки тканей. В задачи этой главы не входит даже беглое обсуждение огромного числа способов обработки, фиксации, заливки, резки, окрашивания и перенесения срезов на сетки. Читателю, интересующемуся данными вопросами, целесообразно изучить последние руководства, описывающие эти разнообразные процедуры, и посоветоваться с работающими в данной области специалистами.

В связи с этим полезно высказать несколько предостережений. Обычные «нормальные» способы приготовления большинства образцов биологической ткани для просвечивающей электронной микроскопии часто специально предназначены для биологических или биохимических целей, далеких от целей исследования минеральных материалов. Тот, кто в первую очередь изучает локализацию и идентификацию биогенных магнитных (или немагнитных) минеральных материалов, должен, по крайней мере на начальных стадиях исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии, поставить во главу угла именно эту задачу, а не заботиться о сохранности клеточных структур ткани.

После того как минералы обнаружены и идентифицированы, можно видоизменить обработку с целью улучшения фиксации самих тканей. Поэтому имеет смысл испробовать все способы, рекомендуемые в методиках, чтобы убедиться в том, что применяемые процедуры и химические препараты соответствуют задачам исследования. Целесообразно поставить в начале работы следующие вопросы.

1. Не вызовут ли химические агенты, используемые при фиксации (фиксаторы, промывочные растворы, буферы, растворители), существенных изменений размеров, формы или даже общей минералогии неорганических материалов, присутствующих или предполагаемых в ткани? Это особенно важно в случае таких минералов, как кальцит и арагонит. В случае магнитных минералов вероятность такого влияния должна быть меньше.

2. Не лучше ли наблюдать минералы (электроноплотные по своей природе) в их исходном состоянии, когда окраска тяжелыми металлами или применение фиксаторов сведены к минимуму или вовсе отсутствуют?

3. Не вызывают ли минералогических изменений температурные и временные факторы, связанные с заключением образца в заливочную среду? Это вполне вероятно в случае находящихся в неустойчивом состоянии гидратов оксидов и гидроксидов железа.

4. Является ли оптимальным pH жидкости в секционном желобе микротома? Не могут ли некоторые минералы растворяться (или окисляться), когда срезы плавают на поверхности раствора перед перенесением их на сетку?

3. Изучение образца в микроскопе

Если образец подготовлен с соблюдением всех необходимых условий, он пригоден для исследования в электронном микроскопе. В этом разделе мы рассмотрим некоторые общие рабочие процедуры, которые могут иметь значение при исследовании минеральных материалов. Многие из этих процедур хорошо известны для одних, но могут показаться новыми для других. Их выполнение требует общего ознакомления с просвечивающим электронным микроскопом.

3.1. Подготовка микроскопа к работе

В отличие от большинства прежних приборов, современный просвечивающий электронный микроскоп представляет собой надежный, легкоуправляемый прибор, требующий минимальных усилий для получения высококачественных микрофотографий. Увеличение стабильности как электронной, так и механической системы позволяет хорошо работать на нем даже неопытному оператору. Тем не менее при исследовании большинства образцов и особенно некоторых минеральных образцов необходимо учитывать ряд факторов.

Прежде чем детально исследовать сетки с образцом, целесообразно убедиться в достаточной чистоте и хорошей юстировке оборудования. Для всех, кроме требующих большой точности и высокого разрешения, видов работ это легко делают в течение нескольких минут, и это время, затраченное вначале, обычно окупается в дальнейшем.

После включения электронного пучка правильную юстировку нити накала и диафрагмы конденсорной линзы можно проверить, фокусируя линзу на экран при небольшом недокале катода. При хорошо отъюстированной нити накала на экране наблюдают симметричное изображение кончика нити, а сцентрированная диафрагма конденсора обеспечивает стабильное положение пучка вблизи центра экрана при небольших дефокусировках конденсорной линзы. Эти две регулировки сберегают время и силы при дальнейшем исследовании, особенно когда возникает необходимость в точной настройке освещения для фотографирования. При нарушении центровки нитей или диафрагм конденсора освещение становится плохим или неравномерным.

Общая центровка остальных линз считается удовлетворительной, если при изменении увеличения или фокусировки изображение сохраняет свое положение в центре смотрового экрана. (У многих приборов эти центровки фиксированны и требуют лишь незначительной подгонки либо вообще не нуждаются в ней.)

Следует проверить центровку диафрагмы линзы объектива и ее влияние на качество изображения. Это легко сделать (в присутствии препарата) путем снижения увеличения до нуля, т. е. выведением микроскопа в дифракционный режим со светящейся точкой в центре экрана. Общее фоновое рассеяние электронов, вызываемое веществом образца, формирует изображение диафрагмы объектива вокруг центральной сфокусированной дифракционной точки. Изображение диафрагмы должно быть кольцевым, свободным от «грязи» и симметричным относительно дифракционной точки.

Чистоту диафрагмы объектива и области вокруг нее устанавливают проверкой астигматизма и разрешающей способности. Это можно сделать разными способами, но один из самых простых состоит в исследовании образца при достаточно высоком увеличении, позволяющем увидеть очень тонкую структуру фона, которую обычно наблюдают на любой покрытой углеродом подложке. При небольших изменениях фокусировки очень мелкие зернышки напыленного углерода должны выглядеть четкими и одинаково симметричными, а по мере достижения истинного фокуса они должны уменьшаться в размерах и утрачивать контраст. Если зерна начинают выглядеть удлиненными, это означает, что изображение имеет астигматические нарушения и его следует исправить, в особенности если требуются микрофотографии при большом увеличении. Отсутствие четких очертаний зерен при фокусировке, возможно, свидетельствует о загрязнении диафрагмы и/или держателя образца или о нестабильности электронной части прибора. Это так называемое «мягкое» изображение будет еще более «мягким» на фото-

графиях, и в таких условиях эксперимент проводить нельзя, так как при этом трудно или вообще невозможно достичь высокого разрешения.

Предварительные испытания оборудования можно проводить на образце, подлежащем исследованию, или на специально изготовленных тест-объектах. Последние используют в процессе технического обслуживания микроскопа. Следует помнить также, что при продолжительном наблюдении исследуемый образец может повреждаться электронным пучком или загрязняться.

3.2. Работа с микроскопом

Исследование и фотографирование большинства обычных образцов в электронном микроскопе относительно несложны, если не требуется особо точной работы с высоким разрешением. При исследовании хорошо приготовленных и равномерно нанесенных на сетку образцов минеральных частиц остается лишь выбрать случайным образом несколько участков для фотографирования при одном или нескольких увеличениях. Изображение тщательно фокусируют и следят, нет ли дрейфа образца – медленного однонаправленного смещения из-за нестабильности подложки или зарядных эффектов. Если высокое разрешение не обязательно, лучше немного недофокусировать изображение, что обычно легко осуществить на практике. Если дрейф есть, то не следует пытаться делать фотографии, так как они все без исключения будут плохими.

Изображение, создаваемое просвечивающим электронным микроскопом на флуоресцирующем экране, образуется – как и следует из названия микроскопа – электронами, прошедшими через образец. Поэтому изменения контраста образца могут быть обусловлены несколькими причинами, в частности различиями в химическом составе за счет масс-абсорбционных эффектов, поскольку более тяжелые атомы поглощают больше электронов, чем более легкие. Существенны также различия в толщине образца и его кристаллической структуре. Так, непрозрачный вид гранулы может объясняться либо слишком крупными размерами, либо электроноплотным материалом, из которого она состоит, либо особенностями кристаллографической ориентации.

При изменении ориентации или фокусировки изображение кристаллических образцов изменяется. Значительные изменения контраста являются результатом дифракции на кристаллической структуре, обусловленной различиями в толщине гранулы при разных ориентациях. Небольшие изменения величины угла Брэгга могут существенно повлиять на изображение, и исследователь должен быть готов к этому, когда производит фокусировку. Интерпретацию таких изображений облегчает серия картин, получаемых при различных расфокусировках. При удалении диафрагмы объектива эти эффекты усиливаются, поскольку при этом увеличивается вклад в общую картину лучей, претерпевших дифракцию. У некристаллических материалов эти явления отсутствуют. Поэтому наличие или отсутствие дифракционных контуров и подобных

изображений очень полезны для решения вопроса о кристаллических свойствах неизвестного твердого материала.

Бóльшая часть минералов и в особенности минералы железа сильнее поглощают электроны, чем неокрашенные биологические ткани. Это свойство можно успешно использовать при поиске минеральных включений в серийных сверхтонких срезах тканей. После выявления областей минерализации делают новые срезы, которые можно окрашивать для детектирования биологических структур. Необходимость в новых срезах возникает потому, что после исследования в просвечивающем электронном микроскопе срезы редко хорошо воспринимают красители.

При фотографировании дисперсного зернистого материала возникает проблема определения выдержки. Автоматические экспонометры могут давать неверные показания, и тогда гранулы могут быть недоэкспонированы по сравнению с фоном. Исследователь должен решить, что более важно – передача общей формы или внутренней структуры. Серия снимков с различными экспозициями гарантирует, что, по крайней мере на одной из фотографий, бóльшая часть гранул будет снята с правильной выдержкой. Когда размеры и толщина частиц в поле зрения варьируют, невозможно выбрать экспозицию, подходящую для всех зерен.

При работе с электронным микроскопом время от времени наблюдают структуры, которые заслуживают упоминания в связи с тем, что они могут иметь артефактное происхождение. Двумя наиболее существенными из них при исследовании дисперсного материала являются кайма и включения.

Светлая или темная кайма по краям объекта может возникать различными путями. Когда кайма расположена вокруг гранул более или менее симметрично, она может быть артефактом фокусировки, возникающим из-за сильной пере- или недофокусировки. Кайма может быть также результатом общего загрязнения, вызванного длительным пребыванием препарата под электронным пучком. Она может возникать и при загрязнении вследствие высыхания растворимых органических материалов, солей, буферов или красителей. Асимметричная кайма может быть вызвана сильным астигматизмом линзы объектива. Не исключено, что ее появление на фотографиях связано с дрейфом образца или изменением ускоряющего напряжения во время фотографирования. В виде каймы может также выглядеть покрытие и тяжелый металл на «солнечной» стороне гранулы, если образец оттенен слишком сильно.

Поэтому, прежде чем рассматривать любой выступ или кайму как реальную структуру, следует исключить возможность артефакта. Если все гранулы (или их бóльшая часть) в поле зрения имеют одинаковую кайму или же все каймы идут в одном и том же направлении, то вероятность артефакта очень велика. В этом случае следует проверить исправность оборудования путем изменения фокусировки и/или установки астигматизма, а также проконтролировать возможность загрязнения пучка путем наблюдения нового участка сетки и выявления в нем

окаймленных структур. Другой контроль загрязнения пучка состоит в уменьшении увеличения и проверке наличия общего потемнения исследованной области.

Химическое загрязнение из-за плохой отмывки может наблюдаться по всей поверхности сетки или быть локальным. В обоих случаях, в особенности при малых увеличениях, исследователю будет казаться, что он ведет наблюдение через запотевшее стекло, причем резкое изображение получить очень трудно. При больших увеличениях растворимые соли, кристаллизующиеся на сетке, будут возгоняться под пучком и, по-видимому, полностью исчезать. При этом контраст изображения будет понижаться и сохранятся лишь его очень слабые контуры.

«Включения» представляют собой другой возможный источник помех. Поскольку изображение в просвечивающем электронном микроскопе подобно тени на освещенном экране, мелкие частички, которые кажутся находящимися внутри крупных, могут быть: 1) поверхностными углублениями, 2) лежащими на поверхности включениями или 3) истинными включениями. Истинные включения могут быть либо твердыми телами, либо пустотами. Если включения твердые, то они будут выглядеть на флуоресцирующем экране темнее окружающего материала, если это пустоты – то светлее своего окружения. Углубления на поверхности выглядят более светлыми, плотно прилегающий к поверхности слой – более темным. Для того чтобы различить внутренние и поверхностные структуры, может быть полезен вид препарата сбоку или поверхностная реплика.

При работе с материалами, оттененными металлами, полезно помнить, что на обычных фотографических снимках «тени» выглядят светлыми. Лишь на негативе или на негативном отпечатке они будут темными.

3.3. Идентификация частиц при помощи электронной дифракции

Ни один из аспектов просвечивающей электронной микроскопии не чреват такими трудностями в получении и интерпретации данных, как электронная дифракция. Особенно рискованна идентификация совершенно неизвестных частиц, и следует предостеречь читателя от больших ожиданий, связанных с применением этого метода. Трудности возрастают, когда имеют дело с мелкими магнитными частицами биогенного происхождения, встречающимися в ограниченном количестве.

Этот раздел не претендует на то, чтобы стать введением в теорию и практику электронной дифракции. Его цель – дать читателю практические советы по работе с образцами тех типов, которые вероятнее всего встретятся при исследовании биоминерализации.

В целом исследование частиц путем электронной дифракции сходно с исследованием дифракции рентгеновских лучей на порошке. Вместо

параллельного пучка рентгеновских лучей определенной длины волны через образец проходит фокусированный пучок электронов с постоянной, но меньшей длиной волны, испытывающий дифракцию на кристаллической структуре в соответствии с законом Брэгга. В отличие от рентгеновских лучей электроны отклоняются магнитным полем, и поэтому изображение результирующей дифракционной картины можно сфокусировать, направить на флуоресцирующий экран и быстро зафиксировать на фотографической пленке. При идентификации образцов с гранулярными включениями стремятся получить четкую и наиболее полную картину дифракции с возможно лучшей калибровкой.

Некоторые образцы, например коллоиды, идеально пригодны для электронной дифракции. Наилучшим образцом является такой, который состоит из большого числа мелких (менее 0,1 мкм) случайным образом ориентированных и близко расположенных (но не слипающихся) тонких кристаллов. Лишь немногие естественные образцы удовлетворяют всем этим требованиям. Если образец для исследования с помощью электронной дифракции должен быть раздроблен на очень мелкие частицы, его обычно бывает достаточно для идентификации более простым способом – рентгеновским методом Дебая–Шеррера. Вместе с тем если количество образца ограничено и его кристаллы велики, он непригоден для исследования методом электронной дифракции, так как электронный пучок не сможет пройти через образец.

В ультратонких срезах могут присутствовать мелкие биогенные кристаллы, и тогда они пропускают претерпевающие дифракцию лучи, но если они немногочисленны, то они не дадут полной картины дифракции, необходимой для идентификации. Лишь в редких случаях такие картины можно точно прокалибровать.

Хотя метод электронной дифракции имеет свои недостатки, не следует отчаиваться. Известно, что картина дифракции отдельного кристалла состоит из пятен и зависит от атомной структуры материала. Образуемая пятнами картина может меняться в зависимости от ориентации кристаллов. Добавочные кристаллы увеличат число пятен. Чем больше кристаллов участвует в создании картины, тем больше появляется пятен и тем больше образуется концентрических колец вокруг центрального пучка, не подвергшегося дифракции. Когда число кристаллов становится очень большим, пятна начинают утрачивать свою индивидуальность и сливаются друг с другом, образуя однородные кольца. Расстояние колец от центрального пучка (и друг от друга) зависит от межплоскостных расстояний в кристаллической структуре. Каждый образец имеет свою характерную картину с индивидуальными «отпечатками пальцев» – межплоскостными расстояниями. Их величины d и относительные интенсивности соответствующих отражений можно найти в таблицах и справочниках, предназначенных для идентификации материалов. Следовательно, идентификация состоит в сравнении межплоскостных расстояний d и интенсивностей дифракционных сечений с табличными данными.

Чтобы произвести точное измерение значений d, дифрактограмма должна быть прокалибрована. Для этого можно использовать несколько методов. Грубую калибровку проводят с помощью сетки с известным образцом, для которого получают дифракционную картину. На пленке или пластинке измеряют диаметры всех дифракционных колец. Известное значение межплоскостного расстояния d (в ангстремах) для каждого из наиболее интенсивных отражений умножают на величины диаметров соответствующих колец. Бóльшие значения будут ближе к центральному пучку, а меньшие - дальше от него. Таким образом, числа, полученные для каждого кольца, должны быть одинаковыми и будут служить при исследовании неизвестных образцов в качестве так называемой постоянной прибора. На практике величины, полученные для разных колец, слегка варьируют, в связи с чем должно быть определено среднее значение константы.

Хотя мы употребили слово «постоянная», есть ряд факторов, которые могут изменять эту величину. Изменение ускоряющего напряжения вызывает соответствующее изменение длины волны электронного пучка и, следовательно, диаметров колец. На диаметр колец влияет также изменение высоты сетки с образцом. Кроме того, нередко кольца бывают не абсолютно круглыми, а слегка овальными, поэтому необходимо учитывать и это обстоятельство. Конечно, использование постоянной прибора при идентификации неизвестных образцов сопряжено с некоторым риском и может приводить к ошибкам.

Точная работа требует использования внутреннего стандарта. При этом известные и неизвестные образцы можно сравнивать друг с другом независимо от действия переменных факторов, связанных с высотой образца или величиной ускоряющего напряжения. Один из простейших и наиболее надежных методов базируется на использовании вакуумного испарения таких металлов, как золото или алюминий. При этом пленку подложки покрывают слоем умеренного количества металла, на который помещают неизвестный образец. Дифракция электронного пучка на этом металлическом слое дает кольца одновременно с кольцами (или пятнами) образца неизвестного состава.

Заслуживают упоминания несколько моментов, связанных с применением этого метода. В случае исследования диспергированных частиц покрытие ими лишь части каждой сетки позволяет получать дифракционные картины как с внутренним стандартом, так и без него, что устраняет необходимость смены сеток или изготовления добавочных сеток. Эта операция достаточно проста: несколько покрытых парлодиевыми пленками сеток помещают по краю двусторонней липкой ленты (как описано ранее), а затем наполовину прикрывают их полоской какого-нибудь тонкого материала для защиты от напыления металла; другая половина сетки при этом остается открытой.

Для целей электронной дифракции кристаллические размеры напыленного металла должны быть достаточно велики. Хотя высокий вакуум препятствует росту зерен металла и способствует получению очень

тонкого фонового изображения, дифракционные кольца дают размытую, нечеткую картину. Поэтому в отличие от операций оттенения (разд. 2.5) вакуум в испарителе не должен достигать высоких величин (достаточно 10^{-3} мм рт. ст.). Кроме того, перед нанесением частиц неизвестной природы поверхность сетки должна быть обработана с целью придания ей гидрофильности (разд. 2.3).

Получение хорошей дифракционной картины, пригодной для идентификации, может быть нелегкой задачей. Прежде всего следует выявить ту область сетки, где частицы имеются в большом количестве, но не слипись в комки. Это может быть особенно трудно в случае магнитных материалов. Если имеют дело с резко выраженными скоплениями, то нужно попытаться использовать для приготовления образцов какой-нибудь из способов распыления (разд. 2.4). Если такие попытки не приносят успеха, возможно, слишком высока концентрация частиц или присутствует много крупных зерен, или же действуют оба эти фактора.

После выявления подходящей области сетки (при удаленной диафрагме линзы объектива) прибор следует перевести в дифракционный режим (т. е. увеличение снизить до нуля) и резко сфокусировать дифракционную точку. Если на образце происходит эффективная дифракция, то дифракционную картину можно легко наблюдать на флуоресцирующем экране. При наличии в приборе ловушки центрального пучка последнюю можно в это время ввести в действие, чтобы убрать засвет от недифрагирующего луча.

Перед фотографированием картины дифракции полезно выполнить две добавочные регулировки, уменьшающие фоновое рассеяние электронов и обеспечивающие четкость картины. Должна быть установлена точная, ограничивающая выделенную область диафрагма. Ее следует подобрать таким образом, чтобы она окружала наименьшую область, дающую полную дифракционную картину. Эта регулировка индивидуальна для каждого образца и не во всех случаях может быть выполнена. Другая полезная регулировка - это расфокусировка конденсорной линзы. При этом происходит потемнение экрана, которое может достичь такой степени, что исчезнет и дифракционная картина. Однако при этом настолько увеличивается резкость изображения, что затрачиваемые усилия вполне оправданы. На практике эта процедура всегда улучшает даже хорошую дифракционную картину, четко видимую на флуоресцирующем экране. Благоприятные результаты такой операции выявляются на правильно экспонированной и проявленной пленке.

Картины дифракции электронов получают и затем фотографируют после ряда регулировок, удовлетворяющих требованиям конкретного образца. Общих рекомендаций, кроме фокусирования центрального пучка, не существует, причем «лучшие» картины редко бывают самыми яркими на экране. Нужно быть готовым к тому, что постоянная регулировка прибора - расфокусировка конденсора и повторная фокусировка дифракционного пятна - дело обычное.

Картина будет в фокусе, если центральный пучок резко сфокусирован

в виде небольшого пятна. Для уверенности в том, что картина хорошо зарегистрирована на пленке, необходимо провести съемку с несколькими выдержками. Точная экспозиция может быть установлена только опытным путем – методом проб и ошибок. Яркую дифракционную картину, образованную интенсивным пучком вблизи центральной точки, можно фотографировать с малой выдержкой, но ее качество невысоко из-за большого фонового рассеяния и расширения колец и пятен. Следует добавить, что не исключено повреждение образца интенсивным электронным пучком в связи с появлением зарядных эффектов; кроме того, структура минералов может существенно изменяться под действием индуцированного пучком нагревания.

4. Анализ порошковых картин дифракции электронов

Идентификация дисперсного материала методом электронной дифракции во многих отношениях сходна с исследованием при помощи метода Дебая–Шеррера дифракции рентгеновских лучей на порошке. В основе его лежит измерение диаметров дифракционных колец на пленке, преобразование этих данных в величины межплоскостных расстояний *d* (в ангстремах) и оценка относительной интенсивности линий. Полученные данные сравнивают с табличными значениями *d* для различных минералов с целью найти соответствия. Эта идеальная ситуация редко встречается при дифракции электронов, поскольку образец имеет, как правило, преимущественную ориентацию, а малое количество гранул не позволяет получить достаточно полную картину.

Преимущественная ориентация образца может привести к полному исчезновению некоторых самых интенсивных отражений, имеющих решающее значение при идентификации по таблицам. Чешуйчатые глинистые материалы служат классическим примером в этом отношении, поскольку наиболее существенные для «диагноза» расстояния *d* являются базальными отражениями, которые не возникают, когда электронный пучок параллелен *c*-оси кристалла. В случае изометрической структуры, такой, например, как магнетит, преимущественная кристаллографическая ориентация не имеет значения для идентификации.

Чаще всего картина отражений бывает неполной, особенно в тех случаях, когда она создается небольшим количеством гранул. Надежная идентификация в этом случае очень трудна, если вообще возможна. Существует прием, который может дать неплохие результаты. Пленку или пластинку помещают в фотоувеличитель, и увеличенное изображение дифракционной картины проецируют на лист белой бумаги. Тщательно отмечают на бумаге положение центрального пучка и возможно большее количество пятен. Измеряют радиусы пятен и группируют пятна с близкими величинами радиусов. Если имеется внутренний стандарт, то, используя как точку отсчета одно из стандартных колец, можно рассчитать расстояния *d*.

Если внутренний стандарт отсутствует (что обычно и бывает), то можно использовать определенную ранее постоянную прибора. До расчета отношений эту постоянную пересчитывают с диаметров на радиусы с учетом увеличения при проекции. Результатами, полученными таким образом, следует пользоваться с осторожностью, особенно в случае совершенно неизвестного материала. Паразитные отражения от других гранул (так называемые «запрещенные» отражения) и наличие другой фазы могут значительно осложнить ситуацию. Тем не менее этот способ успешно используют для проверки предположения о том, какой минерал имеется в образце, или для того, чтобы исключить из рассмотрения определенные минералы.

Фотографическое увеличение картины дифракции используют в том случае, когда кольца достаточно хорошо выражены и все измерения проведены в одном и том же направлении. Однако этот способ не применяют, если имеются лишь неполные группы пятен, поскольку фотографическая бумага при сушке деформируется, и поэтому при определении положения пятен относительно центрального пучка может быть внесена ошибка.

Иногда время от времени получают хорошие картины электронной дифракции, не поддающиеся идентификации или порождающие явно ошибочный список рассчитанных значений *d*. Это особенно досадно, когда исследователь обоснованно полагает, что в образце должен присутствовать тот или иной минерал. Обычно так бывает в том случае, когда не пользуются внутренним стандартом и когда условия приготовления образца чем-то отличаются от тех, при которых был изготовлен «стандарт» постоянной прибора. Иногда полученные загадочные картины можно расшифровать методом проб и ошибок, сделав два допущения: 1) изменилась постоянная прибора и 2) минерал, дающий дифракционную картину, соответствует предполагаемому. При этом кольцевые диаметры наиболее интенсивных линий умножают на величину *d* самой интенсивной линии предполагаемого минерала. Если одно из этих произведений близко к исходной постоянной прибора, то его принимают за новую постоянную прибора, а остальные значения пересчитывают. При условии, что оба вышеприведенных допущения верны, новые значения *d* должны соответствовать предполагаемому минералу.

Этот прием можно также использовать для идентификации картин электронной дифракции тогда, когда постоянная прибора вообще не известна, например в случае фотографий в опубликованных работах. При этом измеряют диаметры колец, предполагают наличие данного минерала, находят постоянную прибора и полученные значения *d* используют, чтобы подтвердить или отказаться от исходного предположения.

5. Заключение

В этой главе описаны некоторые методические приемы, с успехом применявшиеся в нашей лаборатории. Часто для решения конкретной

задачи бывает необходима соответствующая модификация методики. В любой лаборатории, оснащенной просвечивающим электронным микроскопом, всегда имеются справочники или руководства по электронной микроскопии. Для выяснения деталей при поиске новых подходов можно обращаться к этим справочникам или консультироваться с обладающими опытом сотрудниками лаборатории электронной микроскопии. Чтобы описать дисперсный образец по данным, полученным с помощью просвечивающей электронной микроскопии, необходимо овладеть искусством приготовления образца и научиться работать на таких сложных приборах, какими являются электронный микроскоп и дифракционная камера. Прежде чем следовать тому или иному руководству по просвечивающей электронной микроскопии, нужно четко представлять научную проблему в целом и с самого начала решить, что именно требуется узнать об образце. Нецелесообразно начинать исследовать образец при помощи просвечивающего электронного микроскопа лишь затем, чтобы посмотреть, как он выглядит. Должен быть составлен план и определены этапы исследования. Только тогда программа приготовления и исследования образца будет соответствовать особенностям изучаемого материала и поставленной задаче.

Литература

Agar A. W., Alderson R. H., Chescoe D., 1974. Principles and practice of electron microscope operation. In: Practical Methods in Electron Microscopy, Vol. 2(A. M. Glauert, ed), American Elsevier, New York.

Beeston B. E. P., Horne R. W., Markham P., 1972. Electron diffraction and optical diffraction techniques. In: Practical Methods in Electron Microscopy, Vol. 1 (A. M. Glauert, ed.), American Elsevier, New York.

Breese S. S. (ed), 1962. Electron Microscopy, Academic Press, New York.

Chandler J. A., 1977. X-ray microanalysis in the electron microscope. In: Practical Methods in Electron Microscopy, Vol. 5(A. M. Glauert, ed.), American Elsevier, New York.

Dawes C. J., 1971. Biological Techniques in Electron Microscopy, Barnes and Noble, New York.

Fischer R. B., 1954. Applied Electron Microscopy, Indiana University Press, Bloomington.

Gabriel B. L., 1982. Biological Electron Microscopy, Van Nostrand – Reinhold, Princeton, N.J.

Glauert A. M., 1975. Fixation, dehydration and embedding in biological specimens. In: Practical Methods in Electron Microscopy, Vol. 3 A. M. Glauert, ed.), American Elsevier, New York.

Gray P., 1973. The Encyclopedia of Microscopy and Microtechnique, Van Nostrand – Reinhold, Princeton. N. J.

Grimstone A. V., 1977. The Electron Microscopy in Biology, 2nd. ed., Arnold, London.

Haggis G. H., 1966. The Electron Microscopy in Molecular Biology, Longmans, London.

Hall C. E. Introduction to Electron Microscopy, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.

Hawkes P. W., 1972. Electron Optics and Electron Microscopy, Taylor and Francis, London.

Hayat M. A., 1972. Basis Electron Microscopy Techniques, Van Nostrand – Reinhold, Princeton. N. J.

Hayat M. A., 1975. Positive Staining for Electron Microscopy, Van Nostrand – Reinhold, Princeton, N.J.

Hayat M. A., 1981. Principles and Techniques of Electron Microscopy: Biological Applications, 2nd ed., University Park Press, Baltimore.

Hirsch P. B., Howie A., Nicholson R. B., Pashley D. W., Whelan M. J., 1965. Electron Microscopy of Thin Crystals, Butterworths, London.

Hren J. J., Goldstein J. I., Joy D. C. (eds.), 1979. Introduction to Analytical Electron Microscopy, Plenum Press, New York.

Kay D. H. Techniques for Electron Microscopy, 2nd ed., Blackwell, Oxford.

Meek G. A., 1976. Practical Electron Microscopy for Biologists, 2nd ed., Wiley-Interscience, New York.

Mercer E. H., Birbeck M. S. C., 1972. Electron Microscopy: A Handbook for Biologists, 3rd ed., Blackwell, Oxford.

Mokotoff G. F., 1987. Electron Microscopy Laboratory Technique: A Workbook, Library Research Associates, Monroe, N. Y.

Nunn R. E., 1970. Electron Microscopy: Preparation of Biological Specimens, Butterworths, London.

Pease D. C., 1964. Histological Techniques for Electron Microscopy, 2nd eed., Academic Press, New York.

Pinsker Z. G.,1953. Electron Diffraction, Butterworths, London.

Racker D. L. 1983. Transmission Electron Microscopy: Methods of Application, Thomas, Springfield, Ill.

Reid N., 1975. Ultramicrotomy. In: Practical Methods in Electron Microscopy, Vol. 3 (A. M. Glauert, ed.), American Elsevier, New York.

Siegel B. M., 1964. Modern Developments in Electron Microscopy, Academic Press, New York.

Siegel B. M., Beaman D. R. (eds.), 1975. Physical Aspects of Electron Microscopy and Microbeam Analysis, Wiley, New York.

Sjostrand F., 1968. Electron Microscopy of Cells and Tissues, Academic Press, New York.

Thomas G.,1964. Transmission Electron Microscopy of Metals, Wiley, New York.

Venables J. A. (ed.), 1976. Developments in Electron Microscopy and Analysis, Academic Press, New York.

Weakley B. S., 1981. A Beginner's Handbook in Biological Transmission Electron Microscopy, 2nd ed., Churchill/Livingstone, London.

Wenk H.-R. (ed.), 1976. Electron Microscopy in Mineralogy, Springer-Verlag, Berlin.

Wischnitzer S., 1981. Introduction to Electron Microscopy, 3rd ed., Pergamon Press, Elmsford, N. Y.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ГРАНУЛЯРНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ ЖЕЛЕЗА В КЛЕТКАХ

Бенджамин Уолкот [1]

1. Введение

Имеется немало данных о том, что животные, относящиеся к разным таксономическим группам (почтовые голуби, славки, лососи, саламандры, пчелы), способны воспринимать слабые (близкие по интенсивности к геомагнитному) магнитные поля и использовать эту информацию для ориентации. Хотя было выдвинуто предположение относительно других навигационных ориентиров, например запахов (Papi, 1982), существуют данные о том, что некоторые животные способны ощущать магнитные поля. Неизвестно, однако, какая сенсорная система и каким образом создает это «новое» чувство. Открытие бактерий, обладающих магнитотаксисом (Blakemore, 1975), привело к предположению, что в процессе сенсорного преобразования может участвовать оксид железа, в особенности магнетит. Обнаружение магнетита в брюшке пчелы (Gould et al., 1987) и голове почтового голубя (Walcott et al., 1979) позволило предположить, что он играет существенную роль в чувствительности к магнитному полю. Таким образом, если бы в принципе удалось обнаружить магнетит в системе клеток, удовлетворяющих определенным критериям сенсорной системы, то можно было бы локализовать и сенсорную систему, ответственную за восприятие магнитного поля.

Все сенсорные системы состоят из рецепторных клеток (часто, но не всегда из нейронов), имеющих связь с центральной нервной системой. Во многих системах в процессе сенсорного преобразования в рецепторных клетках участвуют специализированные молекулы их мембран. Например, в зрительной системе животных зрительный пигмент абсорбирует кванты света, причем этот процесс изменяет проницаемость мембраны сенсорной клетки для ионов, обычно натрия, что в свою очередь меняет мембранный потенциал рецептора. В результате таких преобразований энергия света превращается в электрический ответ клетки. Этот электрический ответ передается в нервную систему, где он подвергается обработке. В других

[1] *Benjamin Walcott*, Department of Anatomical Sciences, School of Medicine, State University of New York, Stony Brook, New York 11794.

сенсорных системах, например во многих механорецепторах, стимул изменяет ионную проницаемость, по-видимому, непосредственно действуя на мембрану. Однако во всех случаях стимул вызывает изменение мембранной проницаемости, а этот процесс приводит к электрическому ответу.

Рабочая гипотеза, используемая в поисках рецептора магнитного поля, состоит в том, что оксид железа (возможно, магнетит) является общим элементом сенсорного преобразования у многих животных. Для идентификации и описания сенсорной системы, участвующей в рецепции магнитного поля, важно локализовать и исследовать внутриклеточное железо. К сожалению, такие методы, как сквид-магнитометрия дают мало информации о клеточной локализации в тканях магнитных материалов или материалов, подверженных магнитной индукции. Поэтому для выявления железа в тканях пчел и почтовых голубей мы провели гистологические исследования при помощи световой и электронной микроскопии. Мы надеялись, что такой подход позволит нам выяснить, какая ткань (или ткани) является подходящим кандидатом для сенсорной системы, а также, что в дальнейшем это натолкнет нас на мысль о возможном механизме сенсорного преобразования в этой системе.

Цель данной главы – описание некоторых методов, примененных нами, и обсуждение возможностей их использования. В разд. 3 в качестве иллюстративного материала представлены экспериментальные данные о железосодержащих клетках у шмеля.

2. Анатомические методики

2.1. Световая микроскопия

Местоположение свободного железа и его оксидов можно выявить при помощи реакции прусской сини. При использовании этой методики в ткань вводят ферроцианид калия. В присутствии железа образуется ярко-синий осадок – ферроцианид железа. Мы используем этот метод как в случае тотальных препаратов или крупных кусков ткани, так и в случае толстых срезов ткани, заключенных в парафин или мягкую пластмассу, и тонких (1 мкм) срезов, подготовленных для электронной микроскопии.

Для начала полезно исследовать возможно более крупный кусок ткани. Поскольку краситель не проникает в ткань глубоко и плотность ткани не позволяет видеть глубокие структуры, методика тотального окрашивания препарата пригодна главным образом для отдельных слоев ткани или поверхности небольших кусочков. У пчелы, например, можно вскрыть брюшко и окрасить все содержимое. Для этого обнажают ткань путем препарирования и прикрепляют ее миниатюрными иголочками из нержавеющей стали к восковому дну препаровальной ванночки. Затем производят препарирование до тех пор, пока не обнажатся ткани, представляющие интерес. После этого ткань слегка фиксируют забуференным параформальдегидом (4%-ный раствор в 0,1 М фосфатном буфере, pH 7,2)

в течение 30 мин при комнатной температуре, промывают в буфере, освобождают от иголочек, прикрепляющих ее к воску, и погружают в свежеприготовленную смесь равных частей 0,5%-ной HCl и 0,5%-ного ферроцианида калия. Эти исходные растворы готовят заранее в больших количествах и хранят в течение длительного времени. Перед смешиванием порции исходных растворов нагревают до температуры ~ 60°C и прокрашивание также проводят при этой температуре (в термостате). Через 15 мин ткань вынимают из красителя и промывают в буфере. Если окраска недостаточно интенсивна, процедуру окрашивания повторяют, используя свежесмешанный раствор. Не рекомендуется использовать красящую смесь больше 15 мин, поскольку она теряет свою окрашивающую способность и может вызвать артефактные осадки. Эти осадки имеют вид плотных нерегулярно расположенных голубых отложений на поверхности срезов и часто маскируют расположенные под ними структуры.

Окрашенный кусочек ткани исследуют и фотографируют. Клетки, содержащие железо и оксиды железа, выглядят голубыми, а другие ткани остаются неокрашенными. Затем можно обезводить ткань проводкой через спиртовые растворы, просветлить в ксилоле и заключить в заливочную среду для изготовления срезов. Процедура заливки – обычная; она детально описана во многих методических руководствах (например, Humason, 1967).

Тотальные препараты показывают, какие ткани содержат железо, но дают очень мало информации о том, в каком состоянии находится железо и каковы особенности клеток, связанных с железом. В частности, с помощью этой методики нельзя ответить на вопрос, вне- или внутриклеточно расположено железо. Поэтому ткань следует порезать и исследовать в световом микроскопе, предварительно заключив ее в заливочную среду. В качестве заливочной среды можно использовать парафин или гликол-метакрилат (пластмасса JB-4, DuPont/Sorval или Polysciences). Поскольку большинство тканей, с которыми мы работали, имели большой диапазон твердости – от кости до нервной ткани, – мы использовали чаще более твердую пластмассу, а не парафин. При этом сохраняется целостность ткани, а кость режется так же хорошо, как более мягкая окружающая ткань. Процедуру заливки проводили в соответствии с рекомендациями изготовителя, за исключением того, что в некоторых партиях пластмассы требовалось меньшее количество отвердителя, чем было рекомендовано, поскольку в противном случае пластмасса затвердевала слишком быстро и заливка была недоброкачественной. Свежеизготовленными стеклянными ножами могли резать относительно крупные куски ткани (до 1,0 × 1,5 см). Эти ножи делали из стекла толщиной 3/8 или 1/2 дюйма (9,51 и 12,7 мм) при помощи ножеизготовителя типа LKB или DuPont/Sorval. Срезы толщиной 3 мкм, изготовленные при помощи микротома JB-4, помещали для разглаживания на поверхность воды в водяную баню, переносили на предметные стекла, высушивали и обрабатывали соответствующим образом. Если ткань была предварительно окрашена, то срезы можно было накрывать покровными стеклами и

начинать их исследование. Если ткань не была окрашена, то производили следующие операции. Срезы нагревали до 60°C и вновь смачивали погружением в горячую дистиллированную воду. Эта процедура необходима, поскольку при окрашивании применяли стеклянные штативы, которые для предотвращения растрескивания следовало нагревать перед помещением в горячий красящий раствор. Стекла с препаратами обрабатывали в течение 15 мин свежеприготовленным горячим кислым раствором ферроцианида калия, затем промывали дистиллированной водой и подкрашивали контрастирующим красителем Кернехтрота. Он состоит из 5%-ного раствора ядерного быстрого красного в дистиллированной воде. Срезы обрабатывали красителем в течение 30 мин при 60°C, промывали дистиллированной водой, обезвоживали сначала в серии спиртов, а затем в ксилоле и закрывали покровным стеклом.

При наблюдении в световой микроскоп ткань благодаря контрастирующему красителю выглядит красной, а включения железа – интенсивно синими. Если все операции проводят очень тщательно (используют бидистиллят, очищают все стекла, сосуды для окрашивания и т. д.), то поверхностных артефактов мало. Поскольку железо – широко распространенный элемент и у позвоночных оно участвует в дыхании, его выявление в данной ткани еще не означает, что оно всегда в ней имеется. Очевидно, если железо участвует в сенсорном процессе, то оно должно всегда присутствовать в магниторецепторной системе. Исходя из этого, мы установили следующий критерий положительного окрашивания на железо. Окрашивание должно обнаруживаться в одних и тех же клетках, по крайней мере в десяти последовательных срезах, и в одних и тех же клетках определенной ткани – по меньшей мере у пяти различных животных. Позитивное окрашивание при использовании этой методики не доказывает, что обнаружен магнетит, но оно свидетельствует о присутствии железа и его локализации в ткани. Железо, связанное с белками, например в гемоглобине или цитохромных ферментах, никогда не окрашивается. Этот вывод был сделан при попытке окрасить эритроциты голубя или митохондрии в исследуемых тканях. Частицы магнетита окрашиваются так же, как и любые сплавы металлического железа, поэтому в процессе препарирования и окрашивания тканей нельзя использовать никакие инструменты, содержащие железо. Мы наблюдали окрашивание селезенки голубя, которая содержит железо, отщепившееся от гемоглобина. У пчелы (Kuterbach et al., 1982), большая часть железных гранул представлена гидратом оксида железа, например в составе ферритина, и интенсивно окрашивается. Итак, окрашивание ферроцианидом калия является первым шагом при изучении железосодержащих тканей. Эта методика показывает, какие ткани и клетки содержат железо, а также позволяет установить, распределено ли оно диффузно или присутствует в виде гранул.

2.2. Электронная микроскопия

2.2.1. Общие методы

Детальное описание железосодержащих тканей получают в ультраструктурных исследованиях, которые позволяют классифицировать железосодержащие клетки и выявлять внутриклеточную локализацию железа. Во всех случаях данные электронной микроскопии должны коррелировать с данными световой микроскопии. Имея это в виду, мы окрашивали срезы фиксированных и заключенных в среду для электронной микроскопии тканей (толщиной 1 мкм) ферроцианидным методом, а затем тонкие (800 Å) срезы исследовали с помощью электронного микроскопа.

Общим методом подготовки ткани для электронной микроскопии является ее фиксация 2,5%-ным раствором глутарового альдегида в 0,1 М фосфатном буфере, pH 7,4, в течение 1 ч при комнатной температуре. В некоторых случаях, например у голубей, первичную фиксацию осуществляют путем перфузии фиксатором всего животного. В других случаях, например у пчел, ткань выделяют препарированием и фиксируют погружением в среду. После первичной фиксации ткань извлекают из организма, промывают в буфере в течение 30 мин, а затем дополнительно фиксируют в 1%-ном растворе четырехоксида осмия в фосфатном буфере в течение 1 ч. При аналитической электронной микроскопии обработку осмием не производят. Ткань обезвоживают проводкой через ацетон и заключают в пластмассу «Polybed» (Polysciences) или эпон 812. Эпон более предпочтителен для аналитической микроскопии, но он малодоступен в настоящее время. Для обычной микроскопии пригодны любые пластмассы, имеющиеся в продаже.

Толстые или тонкие срезы делают на ультрамикротоме, используя стеклянные или алмазные ножи. Если ткань особенно богата гранулами железа, предпочтительнее алмазный нож, поскольку стеклянный быстро тупится. Срезы помещают на плоские медные сетки, окрашивают в течение 20–30 мин насыщенным водным раствором уранилацетата, промывают, а затем окрашивают в течение 1 мин цитратом свинца по Рейнольдсу. Использование солей тяжелых металлов (четырехоксида осмия, уранилацетата и цитрата свинца) необходимо для выявления клеточных деталей. Для аналитической микроскопии делают более толстые (1500 А) срезы не обработанного осмием материала, заключенного в эпон. Некоторые срезы затем контрастируют ураном и свинцом для выявления структуры клеток, но остальные, предназначенные для анализа, не окрашивают вообще.

При наблюдении в электронный микроскоп на обычных тонких срезах хорошо видна структура клетки. Если присутствует железо, его (по крайней мере, в тех тканях, которые мы изучали) можно выявить в виде электроноплотных частиц или отложений. Часто бывает трудно отличить эти отложения от другого интенсивно окрашенного материала.

Следует отметить, что гранулы железа часто дробят и разрывают срез в процессе его изготовления. К тому же железо обычно является наиболее электроноплотным объектом в срезе. Однако на основе одних ультраструктурных исследований нельзя провести надежную идентификацию материала. Полезно сравнивать ультраструктурные изображения с картинами окрашивания, наблюдаемыми на срезах того же материала толщиной 1 мкм в световом микроскопе.

Заливочные пластмассы, необходимые для электронной микроскопии, значительно тверже, чем гликол-метакрилатные пластмассы, используемые для световой микроскопии. Поэтому окрашивание электронно-микроскопических срезов толщиной 1 мкм связано с трудностями, обусловленными плохим проникновением красителя. Срезы делают на ультрамикротоме, на плаву наносят на предметные стекла, высушивают и обжигают, подогревая стекла в течение приблизительно 30 с на пламени спиртовки. Стекла погружают на 15 мин в горячий красящий раствор, промывают дистиллированной водой, а затем дополнительно окрашивают. Этот процесс можно повторять многократно, пока не достигается удовлетворительная интенсивность окраски. Обычно для этого достаточно двух окрашиваний. В случае необходимости срезы можно обработать красителем Кернехтрота. В результате на срезе виден голубой осадок.

Важно исследовать ряд срезов для того, чтобы убедиться в устойчивости картины окрашивания и в том, что она не связана с загрязнением среза. При подготовке срезов для электронной микроскопии окраска всегда менее интенсивна, чем в других случаях из-за очень тонких срезов и относительной жесткости пластмассы. Тем не менее на срезе можно ясно видеть отложения железа и идентифицировать клетки, содержащие железо. Сориентировав соответствующим образом блок с клетками, можно сделать тонкие срезы для электронной микроскопии. При малом увеличении электронного микроскопа сравнивают клетки, имеющие электроноплотные частицы, с клетками, дающими позитивное окрашивание на железо в световом микроскопе. Это весьма существенно, поскольку не все плотные частицы, видимые в электронный микроскоп, действительно содержат железо.

2.2.2. Аналитическая электронная микроскопия

Чтобы однозначно установить, что электроноплотные частицы содержат железо, необходим рентгеновский микроанализ. Как отмечалось выше, для этого срезы должны быть толще, чем обычные срезы для электронной микроскопии, и их не следует обрабатывать осмием, свинцом или ураном. Срезы можно помещать на стандартные медные сетки, хотя предпочтительнее сетки из углерода. Перед исследованием срезы должны быть покрыты спектрально-чистым углеродом. Углерод

предотвращает зарядные эффекты и обеспечивает некоторую температурную стабильность. Анализ производят на просвечивающем электронном микроскопе, снабженном нерассеивающим детектором и компьютерной системой. Мы использовали JEOL 200C с боковым вводом гониометрической ступени и горизонтальным детектором. Поскольку само оборудование состоит главным образом их железа, очень важно, чтобы рассеяние электронов и рентгеновских лучей было сведено к минимуму. Так, следует использовать жесткую диафрагму рентгеновских лучей и применять графитовый образец. Процедура анализа состоит в локализации клеток с гранулами в неокрашенных срезах. Она облегчается введением дифракционной диафрагмы, благодаря чему повышается контраст. После локализации подходящих клеток и идентификации гранул повышают увеличение и помещают частицы в центре поля зрения. Фокусируют конденсорную линзу, чтобы выделить одну из частиц, и начинают рентгеновский анализ. Обычно мы вели подсчет в течение 200 с и старались, чтобы «время простоя» было небольшим, порядка 4–5%, так что детектор не был насыщен. Полученный рентгеновский спектр сохранялся на дисках компьютера вместе со спектрами других частиц. Кроме того, мы всегда производили анализы участков цитоплазмы вблизи гранул. Однако, поскольку метериала здесь относительно мало и число регистрации рентгеновских импульсов невелико, сравнивать этот фон с частицами следует с осторожностью. Рентгеновское излучение, вызванное частицей, может породить вторичное излучение железных частей станины микроскопа или какого-либо другого материала в срезе. Поэтому мы делали также анализ кусочков загрязнений, обнаруженных на срезах. На основании этих контрольных измерений определяют, присутствует ли железо в загрязнениях. Анализ такого рода позволяет выяснить, содержит ли электроноплотная частица железо и другие элементы, и дает некоторое представление об их количестве (правда, точные количественные измерения провести нелегко). Однако с помощью рентгеновского микроанализа нельзя установить, в каком виде присутствует железо; для этого должны быть использованы другие аналитические приемы.

2.2.3. Другие аналитические методики

Наиболее показательные результаты дает метод электронной дифракции. Электронный пучок фокусируют на частице, находящейся в срезе, когда прибор работает в стандартном дифракционном режиме. Если железо имеет кристаллическую структуру, то должна быть видна картина дифракции. Можно исследовать поля с частицами или отдельные частицы, используя соответственно широкое пятно или тонкий электронный пучок. С помощью анализа картины дифракции определяют структуру кристаллов, которые ее образуют. Таким способом можно идентифицировать магнетит. Однако, если кристаллы очень малы, расположены беспорядочно и рассеяны среди других включений железа,

картина дифракции может быть не видна. Так, нам не удалось обнаружить дифракционных картин железосодержащих гранул у пчел.

В настоящее время разрабатывается еще одна методика – спектроскопия потери энергии электронов. При этом анализируют потери энергии электронами, когда электронный пучок проходит через исследуемую область (гранулу) тонкого среза неосмированного, неокрашенного, покрытого углеродом образца. Эта методика в принципе позволяет определить наличие легких элементов, таких как кислород, а также более тяжелых, которые можно выявить обычным рентгеновским микроанализом. Это позволяет определить отношение железо/кислород в грануле и получить некоторые данные об окисленном состоянии железа. Однако, поскольку в ткани имеются и другие элементы, например фосфор и кальций, а также белок, которые тоже связывают кислород, точное определение этого отношения затруднительно.

Точными тестами на магнетит являются определение точки Кюри (Gould et al., 1978; Walcott et al., 1979) и спектроскопия Мессбауэра (Ofer et al., 1981). Эти тесты обладают двумя недостатками: они требуют больших количеств ткани и не дают анатомической информации. Однако если выделить клетки и ткани, которые по данным рентгеновского анализа и световой микроскопии содержат гранулы железа, то для исследовани состояния железа можно применить и эти два теста.

Таким образом, комбинация структурных, аналитических и гистологических методик дает возможность локализовать частицы железа в клетках и исследовать их.

3. Примеры: шмель

3.1. Введение

Гоулд и др. (Gould et al., 1978) впервые показали, что в брюшке медоносной пчелы (*Apis mellifera*) имеются частички железа. Вслед за этим Кутербах и др. (Kuterbach et al., 1982) установили, что эти частички находятся внутри определенных клеток, так называемых эноцитов, которые лежат под кутикулой и окружают каждый брюшной сегмент. Мы провели исследование клеток в брюшке шмелей (*Bombus* sp.), сходных с пчелами по своему пищевому рациону и поведению, но не выполняющих так называемых танцев, при помощи которых насекомое указывает направление к источнику пищи другим особям из того же улья. Мы обнаружили, что у шмелей, как и у пчел, в брюшке имеются клетки, содержащие железо. В этом резделе приведены данные, которые мы получили на препаратах шмелей при помощи вышеописанных методов.

3.2. Световая микроскопия

Брюшко шмеля разрезали сверху по средней линии, вскрывали, оттягивали иголками края разреза, затем фиксировали и проводили цветную реакцию на железо при помощи ферроцианида калия. Как и у *Apis* (см. Kuterbach et al., 1982), у шмеля наблюдалось интенсивное окрашивание клеточных слоев, окружающих каждый брюшной сегмент. Однако в отличие от *Apis* у шмеля интенсивно развиты жировые клетки, вследствие чего голубая окраска эноцитов менее заметна. И все же, если удалить слой этих клеток и посмотреть препарат в световом микроскопе, голубое окрашивание становится хорошо различимым. После окрашивания на железо фиксированных и заключенных в гликол-метакрилат срезов брюшных сегментов выявляются клетки, содержащие железо (рис. 7.1). На срезе на рис. 7.1 под кутикулой видна группа клеток с плотным зернистым материалом, который при просмотре в проходящем свете кажется голубым. При бóльшем увеличении (рис. 7.2) гранулярная природа окрашенного материала становится еще очевиднее; можно заметить также, что окрашены не все клетки. Следует указать, что данный участок был специально выбран для демонстрации позитивного окрашивания клеток и что на других участках срезов окрашенных клеток было меньше. Гранулы распределены внутри клеток, по-видимому, более или менее равномерно, и при данном увеличении не удается заметить их связи с какой-либо определенной структурой.

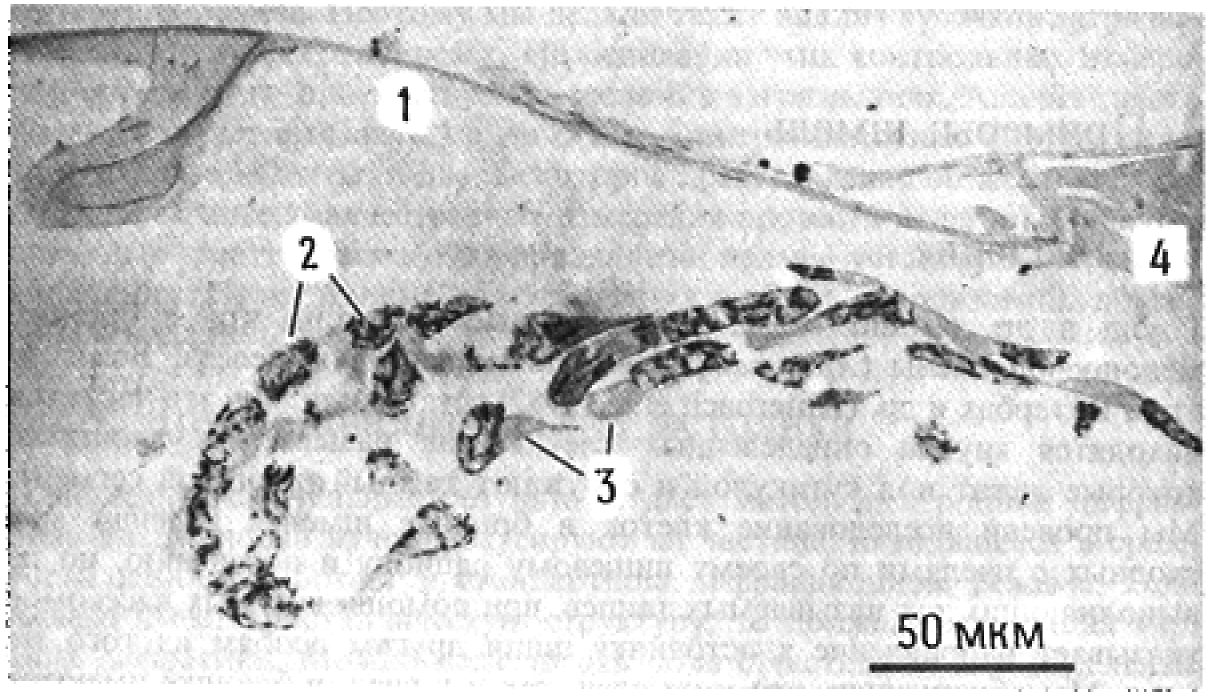


Рис. 7.1. **Микрофотография в световом микроскопе при небольшом увеличении срезов, заключенных в гликол-метакрилат и окрашенных ферроцианидом калия и красителем Кернехтрота. Клетки, содержащие темный гранулярный осадок, при визуальном наблюдении кажутся голубыми.** *1* – кутикула, *2* – эноцит, *3* – жировая клетка, *4* – мышца.

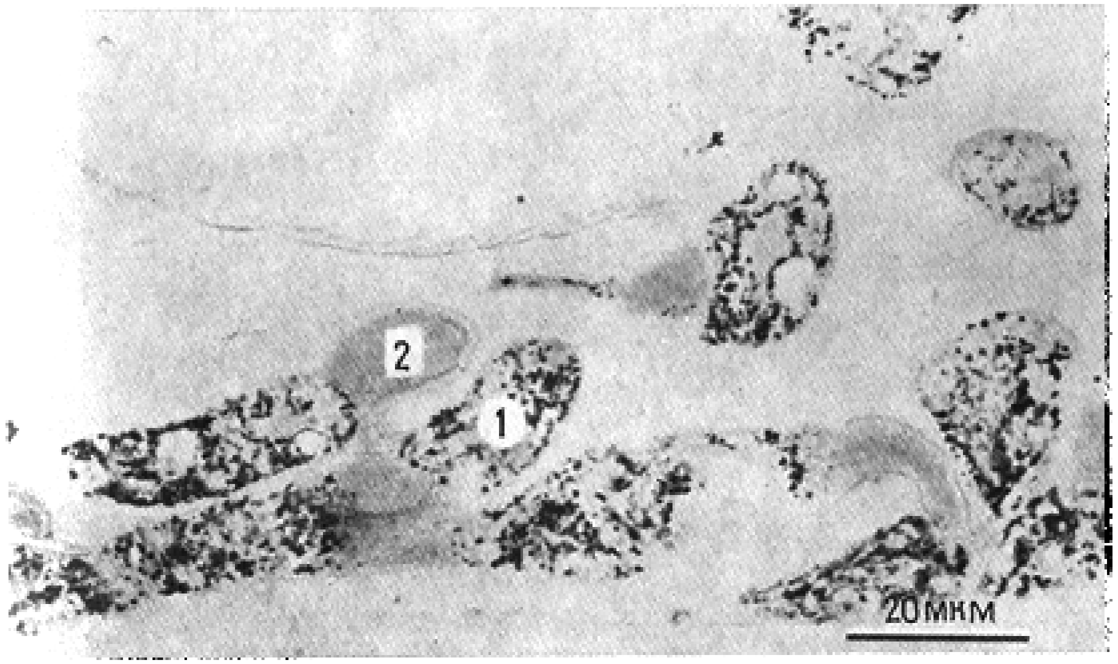


Рис. 7.2. **Микрофотография толстого среза в световом микроскопе при большом увеличении. Обратите внимание на гранулярное окрашивание и плотные частицы в вакуолизированных эноцитах; в отличие от цитоплазмы в эноцитах цитоплазма жировых клеток гомогенна.** *1* – эноцит, *2* – жировая клетка.

Среди эноцитов встречаются неокрашенные жировые клетки с гомогенной цитоплазмой. Вместе с тем в цитоплазме эноцитов, содержащих железо, имеются вакуоли. Просматривая срезы, можно составить схему распределения клеток, содержащих железо, в каждом брюшном сегменте и показать, что на вентральной стороне брюшка таких клеток больше, чем на дорсальной. В непосредственной близости от этих клеточных слоев, особенно около вентрально расположенных сегментарных ганглиев, проходят крупные пучки нервных волокон.

3.3. Электронная микроскопия

Брюшные сегменты фиксировали и заключали в гистологическую среду, как это принято в электронной микроскопии. Толстые (1 мкм) срезы окрашивали ферроцианидом калия и получали при этом картину, которая была описана выше. Затем блоки ткани обрезали, оставляя области с наиболее высокой плотностью клеток, содержащих железо, изготавливали тонкие срезы и окрашивали их для электронной микроскопии. На таких срезах видны клетки двух типов (рис. 7.3): клетки с мелкими пузырьками и большими нерегулярными электроноплотными включениями и клетки с крупными пузырьками и более мелкими частицами, обладающими высокой электронной плотностью. На толстых срезах того же материала при просмотре в световой микроскоп цветную реакцию на железо давали только клетки с мелкими плотными частицами и крупными пузырьками. При обычной электронной микро-

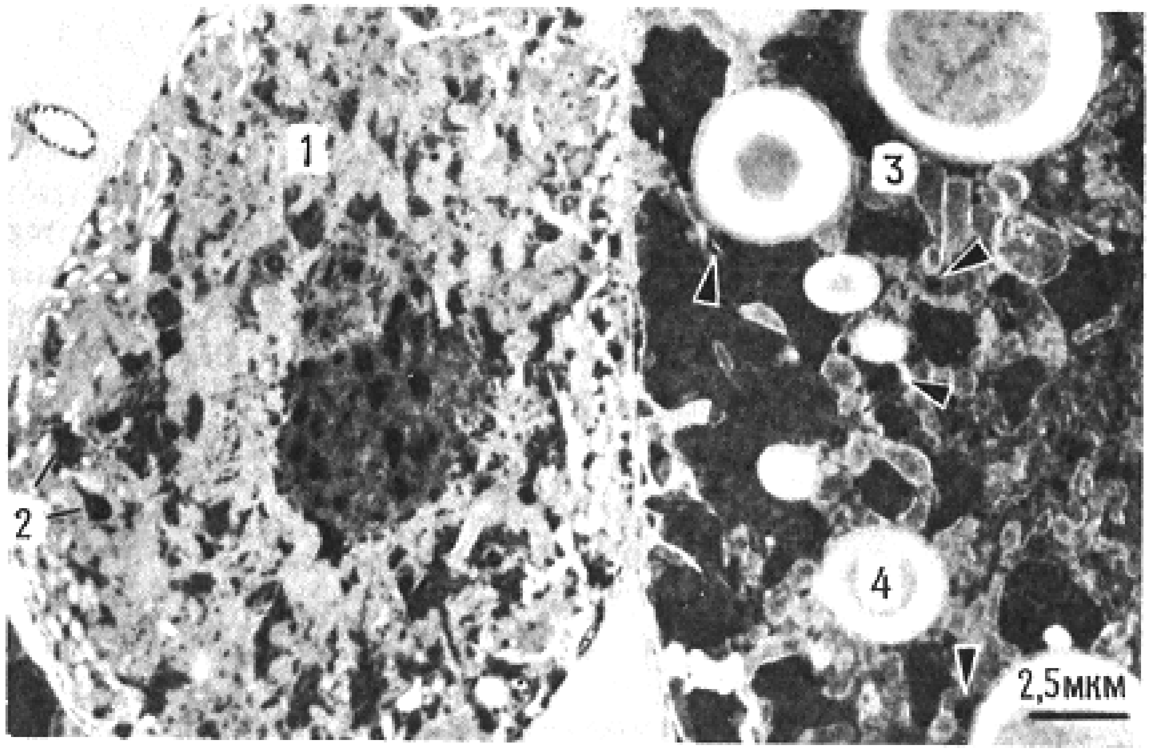


Рис. 7.3. **Микрофотография жировой клетки и примыкающего к ней эноцита в просвечивающем электронном микроскопе при небольшом увеличении. В этом осмированном и окрашенном срезе плотность цитоплазмы обеих клеток высока. Жировые клетки (*1*) содержат аморфные плотные гранулы (*2*), тогда как эноциты (*3*) содержат мелкие плотные гранулы (указаны стрелками) и крупные вакуоли (*4*).**

скопии цитоплазма в клетках обоих типов выглядит плотной, и при малом увеличении мелкие гранулы железа в ней часто трудно выявить. При большом увеличении гранулы становятся заметнее (рис. 7.4), часто они связаны с мембранами эндоплазматического ретикулума, а в некоторых случаях, по-видимому, окружены мембраной. Частички диаметром около 0,7 мкм часто встречаются группами, образуя электроноплотную массу больших размеров.

Чтобы выявить частицы более отчетливо и провести анализ элементного состава, делали толстые (1500 Å) срезы неосмированных, заключенных в эпон кусочков брюшка *Bombus*. После окраски уранилацетатом и цитратом свинца становились видимыми клеточные детали. На срезе на рис. 7.5 видны края двух соседних клеток: одной (жировая клетка) с большими электроноплотными гранулами и другой (эноцит) с более мелкими и еще более электроноплотными гранулами. Более мелкие гранулы эноцита могут в процессе резки разрушать материал, чего никогда не наблюдается в случае более крупных гранул жировых клеток. Это свидетельствует о том, что гранулы меньшего размера имеют большую плотность и твердость. Их диаметр составляет от 0,2 до 1,0 мкм, они чаще всего имеют шарообразную форму, но могут быть и продолговатыми; нередко они образуют скопления.

Когда срезы не окрашены, клеточные детали не видны (рис. 7.6), правда, мелкие гранулы эноцитов выглядят электроноплотными, как и

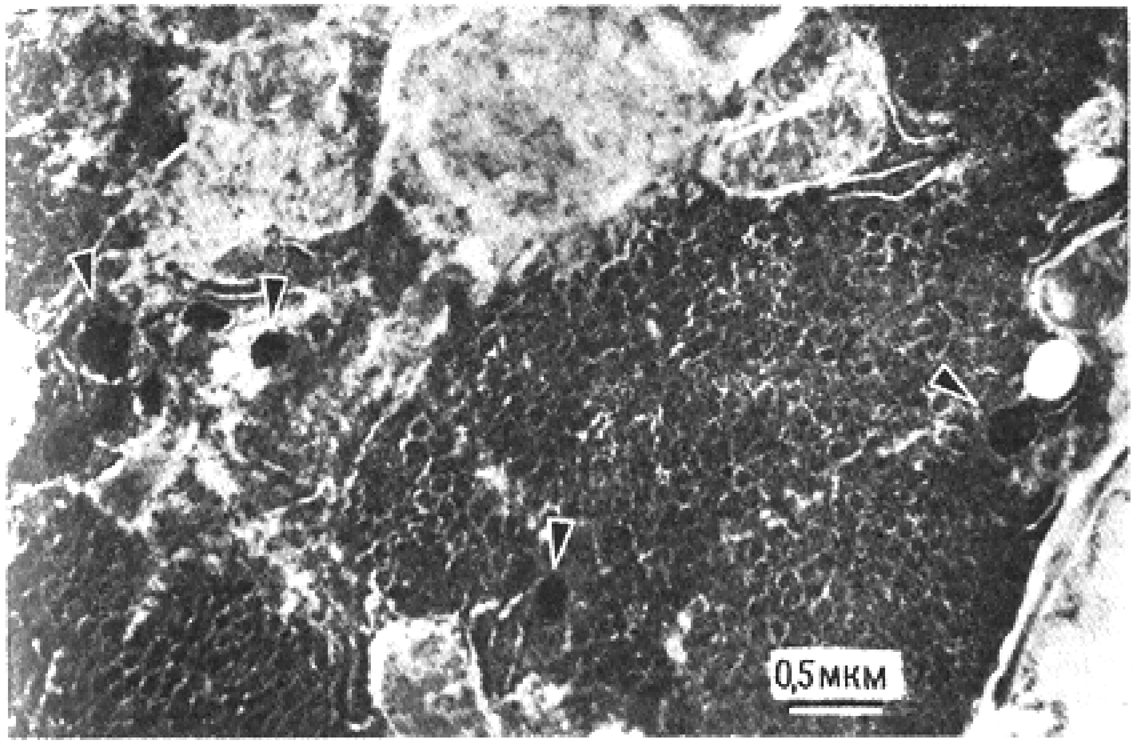


Рис. 7.4. **Электронная микрофотография цитоплазмы эноцита при большом увеличении. Обратите внимание на мелкие плотные гранулы (указаны стрелками), которые часто связаны с мембраной.**

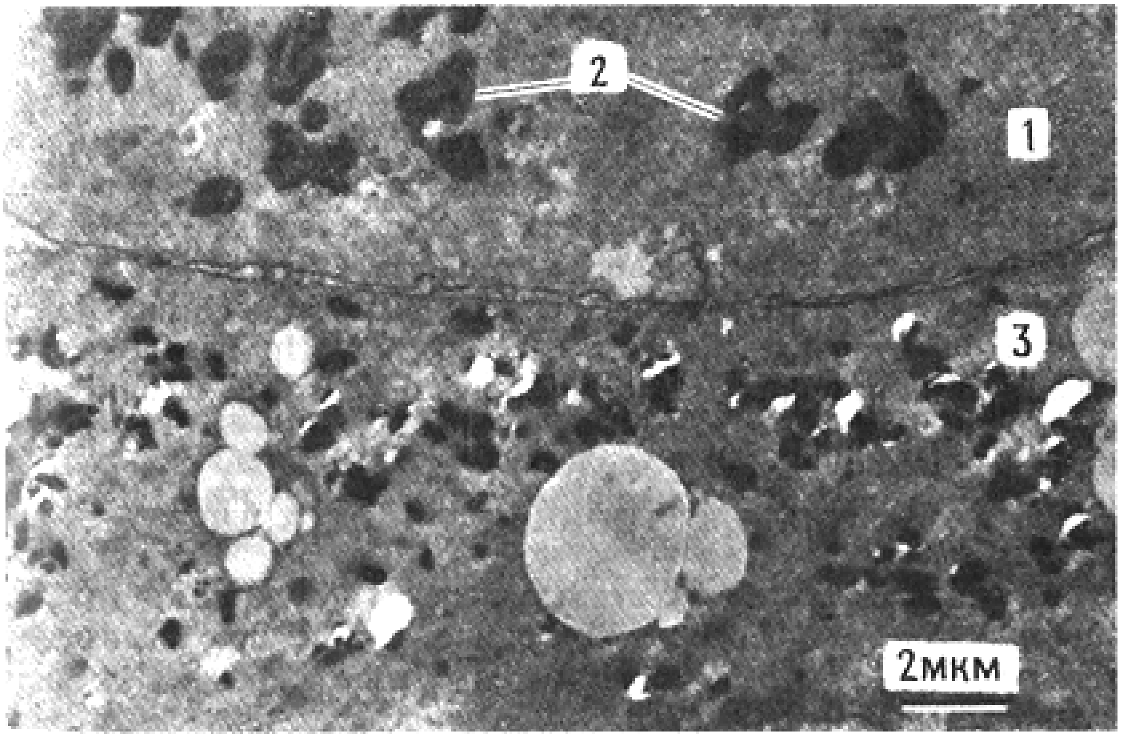


Рис. 7.5. **Электронная микрофотография толстого (1500 Å) среза неосмированной ткани, окрашенной уранилацетатом и цитратом свинца, при малом увеличении. Жировая клетка (*1*) с крупными аморфными гранулами (*2*) примыкает к эноциту (*3*), содержащему большое количество мелких плотных гранул. Обратите внимание, что многие из этих гранул разрушили материал среза.**

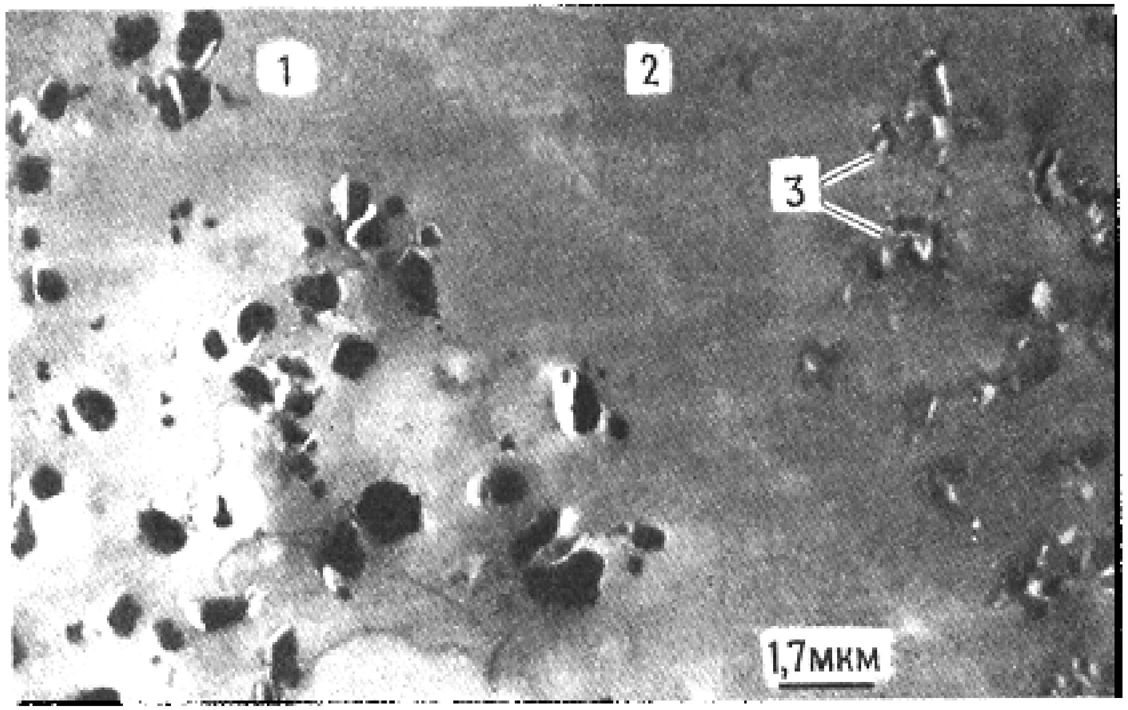


Рис. 7.6. Электронная микрофотография неосмированного неокрашенного толстого среза, использованного для рентгеновского анализа на элементный состав. Обратите внимание на мелкие плотные гранулы в эноците (*1*) и значительно менее плотные гранулы (*3*) в жировой клетке (*2*).

на окрашенных срезах. Это является дополнительным свидетельством их высокой электронной плотности, обусловленной тем, что они образованы, по-видимому, не из органических молекул, а содержат тяжелый элемент. Напротив, крупные гранулы жировых клеток очень плохо видны на неокрашенных срезах. Это свидетельствует о том, что они состоят из органических молекул, которые становятся электроноплотными только после дополнительного окрашивания. Поскольку неокрашенные срезы не содержат чужеродных тяжелых металлов, их можно использовать для анализа элементного состава. Присущая мелким гранулам высокая плотность делает их хорошо видимыми, в связи с чем возможен их индивидуальный анализ.

3.4. Аналитическая электронная микроскопия

Для исследования элементного состава гранул мы использовали толстые неокрашенные срезы не обработанной осмием ткани. Для уменьшения зарядных эффектов и дрейфа образца срезы были покрыты спектрально-чистым углеродом. На рис. 7.6 представлена микрофотография такого среза, сделанная на просвечивающем электронном микроскопе. Электронный луч сужен до пучка, дающего в фокусе пятно с диаметром 0,5 мкм, и нацелен на одну из мелких плотных гранул эноцита. После 200 пробегов был получен рентгеновский спектр, представленный на рис. 7.7, *А*. Скорость счета составляла около 60 в 1 с, а время «простоя»

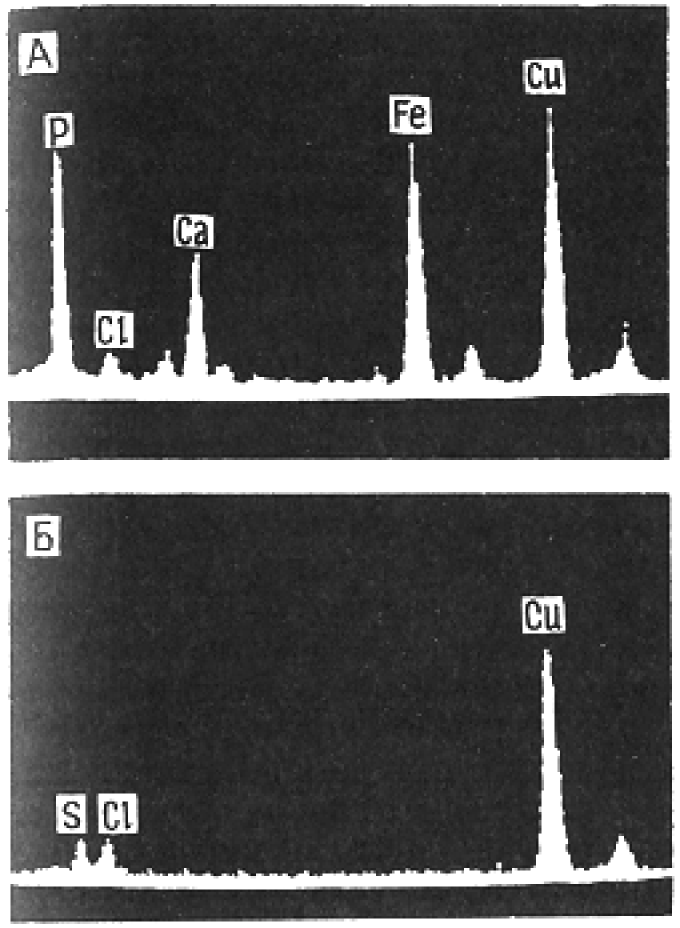


Рис. 7.7. Рентгеновский спектр мелкой гранулы эноцита (*А*) и аморфной гранулы жировой клетки (*Б*). По оси абсцисс – энергия рентгеновских лучей, по оси ординат – число регистрируемых импульсов на канал. Амплитуда максимального пика - 256 импульсов. Видны пики, характерные для железа, меди, кальция, фосфора и хлора (*А*) и меди, серы и хлора (*Б*). Пик меди происходит из сетки, пик серы, по-видимому, из гранулы, а пик хлора – из заливочного полимера.

было в среднем приблизительно 4%; следовательно, детектор работал не в области насыщения. Анализ показал наличие четких пиков железа, кальция, фосфора и меди. Однако сигнал меди, по-видимому, происходит из опорной сетки. Это видно, когда пучок перемещается на одну из крупных и менее электроноплотных гранул в жировой клетке. В этом случае наблюдается (рис. 7.7, *Б*) большой пик меди от сетки-подложки и слабые сигналы серы и хлора. Последний обусловлен, видимо, эпоновой основой, а пик серы, вероятно, частицей. Однако в этом случае не обнаруживалось сигналов железа, кальция или фосфора. Итак, этот анализ показывает, что мелкие электроноплотные частицы в эноцитах содержат железо. В табл. 7.1 представлены результаты того же анализа, что и на рис. 7.7, но в цифровом виде. В стандартной компьютерной программе был учтен вклад фонового рентгеновского излучения, и, таким образом, каждый пик представляет собой интегральную величину. В связи с данными, приведенными в табл. 7.1, следует отметить несколько важных моментов. Во-первых, контроль дает пик меди, сравнимый по величине (число регистрируемых импульсов рентгеновского излучения) с пиком экспериментального образца, но железо в контроле не обнаруживается. Во-вторых, в спектре мелкой электроноплотной гранулы соотношение между пиками железа K_{α} и K_{β} соответствовало определенному по атомной структуре железа, а именно K_{β} составляя 15% K_{α}. При определенных условиях медь может давать пик

Таблица 7.1. Количественный анализ элементов [1]

	Энергия	Площадь	Элемент	Линия
Рис. 7.7, *А*	2,021	1856	P	K_α
	2,626	202	Cl	K_α
	3,338	166	K	K_α
	3,703	943	Ca	K_α
	6,411	1803	Fe	K_α
	7,059	275	Fe	K_β
	8,054	2003	Cu	K_α
	8,917	295	Cu	K_β
	Железо (Fe) $K_\beta/K_\alpha(100) = 15{,}3$			
Рис. 7.7, *Б*	2,313	253	S	K_α
	2,644	224	Cl	K_α
	8,050	1832	Cu	K_α
	8,912	276	Cu	K_β

[1] Энергия выражена в килоэлектрон-вольтах (кэВ), а площадь – в числе регистрируемых импульсов за 200 с. Как и ожидали, пик K_β железа составляет 15% пика K_α, что свидетельствует об отсутствии вклада других элементов.

«утечки», очень близкий к пику K_β железа. Однако, поскольку в этом случае соотношение пиков железа соответствовало ожидаемому, можно считать, что эти пики определены достаточно точно. Был проведен ряд анализов, в том числе анализ на загрязнение срезов, и во всех случаях единственным источником железа, кальция и фосфора оказались мелкие электроноплотные частицы в эноцитах.

4. Заключение

В этой главе описан гистологический подход к проблеме локализации гранулярного железа в тканях и клетках. Это один из многих приемов, необходимых для проверки гипотезы о том, что животные используют оксиды железа в процессе сенсорного преобразования, связанного с обнаружением магнитного поля. В настоящее время известно о наличии магнетита у пчел (Gould et al., 1978), почтовых голубей (Walcott et al., 1979; Presti, Pettigrew, 1980) и дельфинов (Zoeger et al., 1981). Однако в этих работах применялись разные методики, и полного совпадения данных не наблюдается.

Уолкот и др. (Walcott et al., 1979), используя сквид-магнитометр и определение температурной точки Кюри изолированного материала, обнаружили магнетит в соединительной ткани на внутренней поверхности дорсальной части черепа почтовых голубей. В другой работе, где применялись сходные методы (Presti, Pettigrew, 1980), показано, что магнитный материал находится не в черепе, а в шейных мышцах. В более поздней работе (Walcott, Walcott, 1982) не удалось подтвердить ни те, ни

другие данные, хотя было исследовано свыше 80 птиц, среди которых были и почтовые голуби, показавшие на практике свои ориентационные способности. При помощи описанной в этой главе гистологической методики окрашивания ферроцианидом калия мы изучали область головы и шеи голубей. При этом было обнаружено, что многие клетки дают положительную окраску на железо. В частности, окрашиваются клетки, окружающие обонятельный нерв в клюве, а также клетки, связанные с вентральной поверхностью обонятельных долей. Однако результаты, полученные на разных особях, не всегда совпадали. Так, вышеописанные данные отмечены только у 70% исследованных птиц. Окрашивание наблюдалось также в некоторых клетках различных желез, например слезной и слюнной. Мы полагаем, однако, что эти клетки являются макрофагами, участвующими в разрушении эритроцитов и их гемоглобина. При исследовании селезенки – органа, где происходит интенсивный обмен эритроцитов,- также обнаружено много клеток с крупными положительно-окрашенными включениями. Этот факт также подтверждает наше предположение о природе окрашивания клеток желез.

Гоулд и др. (Gould et al., 1978) при помощи магнитометрии обнаружили магнитные свойства у пчел; измерение температурной точки Кюри показало, что магнитные частицы, выделенные из высушенных брюшных отделов пчел, представляют собой магнетит. Позднее было установлено гистологическим путем, что клетками, содержащими гранулы железа, являются эноциты, окружающие каждый брюшной сегмент (Kuterbach et al., 1982). Однако в исследованиях изолированных эноцитов при помощи мессбауэровской спектроскопии было обнаружено, что по крайней мере 95% всего железа находится в виде водного оксида железа,а не магнетита. Следовательно, данные о локализации и состоянии железа в тканях пчелы противоречивы. Возможно, что различия в результатах связаны с использованием разных методов сушки: длительного обезвоживания при комнатной температуре или быстрого замораживания – высушивания в лиофилизаторе.

С помощью магнитометрии изолированных тканей дельфина был обнаружен магнитный материал, который по низкотемпературному тесту на многодоменный магнетит соответствовал магнетиту (Zoeger et al., 1981). К сожалению, исследование с помощью сканирующего электронного микроскопа не выявило, как этот магнитный материал связан с тканями, и в особенности с нервной системой.

В заключение можно сказать, что данные об участии оксида железа, особенно магнетита, в восприятии магнитного поля многоклеточными животными в настоящее время весьма неубедительны. В этом направлении предстоит еще большая работа. Для изучения подходящих объектов следует использовать все доступные методы исследования – магнитометрию, гистологический анализ, анализ элементарного состава, мессбауэровскую спетроскопию, электрофизиологический анализ и т. д. Вопрос о том, участвует ли магнетит или какой-либо другой оксид

железа в поведенческих реакциях животных на слабые магнитные поля, нельзя решить при помощи одной какой-нибудь методики.

Благодарности. Мне хотелось бы поблагодарить Р. Дж. Ридера за помощь в рентгенографическом микроанализе и К. Мак-Кеона за техническую помощь. Я благодарен также С. Шаху за подготовку срезов тканей шмеля. Эта работа субсидирована NIH Grant GM-28804.

Литература

Blakemore R. P. (1975). Magnetotactic bacteria, Science, **190**, 377–379.

Gould J. L., Kirschvink J. L., Deffeyes K. S. (1978). Bees have magnetic remanence, Science, **201**, 1026–1028.

Humason G. L., 1967. Animal Tissue Techniques, 3rd ed., Freeman, San Francisco.

Kuterbach D., Walcott B., Reeder R. J., Frankel R. B. (1982). Iron-containing cells in the honey bee (*Apis mellifera*), Science, **218**, 695–697.

Ofer S., Paracfthymiou C., Frankel R. B., Lowenstam H. A. (1981). Mossbauer spectroscopy of iron-containing dermal granules from *Molpadia intermedia*, Biochim. Biophys. Acta, **676**, 199–204.

Papi F., 1982. Olfaction and homing in pigeons: Ten years of experiments. In: Avian Navigation (F. Papi and H. G. Wallraff, eds.), Springer-Verlag, Berlin.

Presti D., Pettigrew J. D. (1980). Ferromagnetic coupling to muscle receptors as a basis for geomagnetic field sensitivity in animals, Nature, **285**, 99–100.

Walcott B., Walcott C., 1982. A search for magnetic field receptors in animals. In: Avian Navigation (F. Papi and H. G. Wallraff, eds.), Springer-Verlag, Berlin.

Walcott C., Gould J. L., Kirschvink J. L. (1979). Pigeon have magnets, Science, **205**, 1027–1029.

Zoeger J., Dunn J. R., Fuller M. (1981). Magnetic material in the head to the common Pacific dolphin, Science, **213**, 892–894.

Глава 8

МАГНИТОЭКРАНИРОВАННЫЕ КОМНАТЫ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА: КОНСТРУКЦИИ И МАТЕРИАЛЫ

Гейри Р. Скотт, Клифф Фролих[1]

1. Введение

Развитие измерительной техники за последние десять лет привело к появлению ряда новых областей исследования в палео- и биомагнетизме. Одним из таких технических достижений была разработка и организация серийного производства магнитометров на основе сверхпроводящего квантового интерферометрического датчика – сквида, позволяющего измерять малые магнитные поля – в сто раз меньшие, чем это было возможно раньше. Такое улучшение чувствительности позволило палеомагнитологам исследовать остаточный магнетизм осадочных пород и значительно расширило географический и хронологический охват палеонтологического материала. Сквид-магнитометры открыли новые возможности также в психологии и медицине.

По ряду причин применение сквидов сопряжено с необходимостью магнитного экранирования помещений, где проводится эксперимент. Во-первых, образец при измерениях не вращается, а перемещается поступательно и, следовательно, может дополнительно намагнититься в поле Земли, что часто нежелательно. Кроме того, образцы намагничиваются в процессе их приготовления и хранения, а также при проведении лабораторных анализов; все это может занимать несколько дней и даже месяцев. Далее, био- и палеомагнитные исследования, в ходе которых измеряются очень слабые магнитные поля – порядка 10^{-8} и менее от магнитного поля Земли,– значительно упрощаются, если проводить их при малых внешних полях. Одно из таких упрощений состоит в применении градиентометра первого, а не более высокого порядка, как в обычных условиях, т. е. без экранирования.

О возможности использования специальных контейнеров или комнат для экранирования от низкочастотных и постоянных магнитных полей было известно очень давно (Wills, 1899). Сфера из ферромагнитного материала с магнитной проницаемостью μ, имеющая внутренний радиус

[1] *Gary R. Scott*, Lodestar Magnetics, Inc., Oakland, California 94608. *Cliff Frohlich*, Institute for Geophysics, University of Texas, Austin, Texas 78712.

R_1 и наружный R_2, ослабляет внешнее магнитное поле в S раз, причем коэффициент экранирования удовлетворяет соотношению (см., например, Jackson, 1962)

$$S = \frac{2\mu}{9}\left(1 - \frac{R_1^3}{R_2^3}\right).$$

Во множестве работ (Wills, 1899; Wadley, 1956; Cravath, 1957; Schwiezer, 1962; Cohen, 1967; Thomas, 1968; Cohen et al., 1970; Wikswo, 1975) показано, что многослойный экран более эффективен, чем экран из одного слоя большой толщины (рис. 8.1). Это обстоятельство использовалось для создания экранов из нескольких (до шести) слоев мю-металла с коэффициентом экранирования около 10000 (Erne et al., 1981; Mager, 1981; Kelha, 1981).

Литература, посвященная практическим аспектам конструирования магнитоэкранированных комнат, весьма скудна. Наиболее полным руководством такого рода является работа Пэттона (Patton, 1967), в которой не только детально обсуждены минимальная толщина стенки, предполагаемая эффективность экранирования и т. п., но и описаны сконструированные автором экранированные комнаты. Наш опыт и опыт других исследователей (Scott, Frohlich, 1980; Symons, Stupavsky, 1983) подтверждает многие выводы и наблюдения указанной работы. Например, Пэттон совершенно прав в том, что в большинстве магнитоэкранированных комнат экранировка достигается главным образом за счет остаточной намагниченности материала экрана. Он же отмечает, что для создания магнитостатического экрана можно использовать недорогую трансформаторную сталь вместо гораздо более дорогостоящих материалов с высокой магнитной проницаемостью, таких, например, как мю-металл (табл. 8.1). Это относится к случаю, когда значительная часть поля в пространстве, ограниченном экраном, соз-

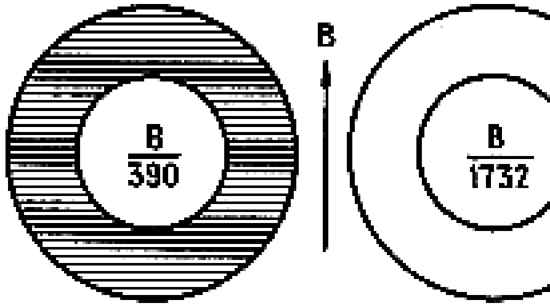


Рис. 8.1. Две тонкие оболочки обеспечивают более эффективное экранирование, чем одна очень толстая. Например, в соответствии с формулами, приведенными в работе Schweizer, 1962, экран в виде сферического слоя с внутренним радиусом R и внешним $2R$, изготовленный из материала с магнитной проницаемостью $\mu = 2000$, ослабляет внешнее поле в 390 раз, а экран из двух сферических оболочек толщиной $0{,}05R$, имеющих радиусы R и $2R$, обладает коэффициентом экранирования 1732.

Таблица 8.1. Сравнение трансформаторной стали и мю-металла

Трансформаторная сталь	Мю-металл
Средняя магнитная проницаемость	Большая магнитная проницаемость
Средняя остаточная намагниченность	Малая остаточная намагниченность
Большая индукция насыщения	Средняя индукция насыщения
Стоимость 1 кг – 1,30 долл. (на 1982 г.)	Стоимость 1 кг – 9,00 долл. (на 1982 г.)
Отжигается при изготовлении	Стоимость отжига 125 долл. за лист (на 1982 г.)
Обрабатывается в процессе сборки экрана	Обрабатывается до отжига
Широкие возможности выбора размеров и формы листов	Ограниченные возможности выбора размеров и формы листов
Материал хрупок – для обработки требуется высокопрочный инструмент	Материал пластичен – легко обрабатывается
Удельное электрическое сопротивление $50 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	Удельное электрическое сопротивление $62 \cdot 10^{-6}$ Ом·см
Состав: 96% Fe, 4% Si; в качестве восстановителя в расплаве металла используется кремний	Состав: 75% Ni, 18% Fe, 5% Cu, 2% Cr; для восстановления применяется отжиг в атмосфере водорода
Экранирующие свойства определяются остаточной намагниченностью	Экранирующие свойства определяются спонтанной намагниченностью

дается лабораторным оборудованием и нет смысла затрачивать большие средства на тщательное экранирование.

Наряду с этим наша практика выявила и нецелесообразность некоторых приемов, предлагавшихся рядом авторов (Patton, Fitch, 1962; Patton, 1967; Thomas, 1968). Так, например, в работе Patton, 1967 высказывается мнение, что магнитный экран обязательно должен быть полностью замкнутым, поэтому особое внимание уделяется конструированию плотно закрывающихся металлических дверей и соединений между листами экранирующего материала. Однако открытые двери или неидеальная заделка швов между листами не сильно влияют на качество статического магнитного экранирования; нужно только правильно ориентировать открытые участки по отношению к направлению магнитного поля и его градиента. В некоторых случаях можно достичь эффективного экранирования с помощью только двух параллельных стенок (без пола и потолка).

В разд. 2 обсуждаются различные типы экранов для электрических и магнитных полей и свойства материалов, используемых для изготовления экранов.

Разд. 3 посвящен практическим аспектам конструирования магнитоэкранированных комнат из листовой трансформаторной стали, причем в основном – описанию деталей конструкции таких комнат, основанному не на теоретических соображениях, а на эмпирических исследованиях – в том числе и одного из авторов (Г. Р. С), спроектировавшего и построившего за период 1981–1983 гг. 7 экранированных комнат.

Разд. 4 иллюстрирует положения разд. 2 и 3 на примерах некоторых из этих конструкций.

2. Общие принципы электрического и магнитного экранирования

2.1. Типы экранов

Магнитное экранирование имеет долгую историю, и тем не менее принципы устройства магнитных экранов иногда плохо понимают даже создающие их экспериментаторы. Одна из причин этого состоит в том, что, хотя «экранированные комнаты», предназначенные для разных целей, изготавливаются из несколько различающихся материалов и имеют разные конструкции, выглядят они почти одинаково. Так, большинство электростатически- и магнитоэкранированных комнат представляют собой просто коробки, покрытые со всех сторон металлическими листами. Поскольку ферромагнитные металлы – сравнительно хорошие проводники, магнитоэкранированные комнаты обычно обеспечивают также электростатическую и электромагнитную экранировку, даже если такой цели при их проектировании не ставилось.

Наиболее важными физическими характеристиками материалов, предназначающихся для изготовления экранов, являются удельное электрическое сопротивление ρ, относительная магнитная проницаемость μ и остаточная намагниченность. Электрическое сопротивление R проводника длиной L и сечением A равно

$$R = \rho L/A.$$

Магнитная проницаемость μ связывает изменение внешнего магнитного поля $\Delta\mathbf{H}$ с изменением магнитной индукции материала $\Delta\mathbf{B}$:

$$\Delta\mathbf{B} = \mu\Delta\mathbf{H}.$$

Вообще говоря, проницаемость зависит от величины и частоты внешнего поля, от расположения образца относительно вектора поля и от многих других факторов.

Остаточной называют намагниченность, приобретаемую магнитным материалом после того, как он был на некоторое время помещен в магнитное поле. Сопротивление, проницаемость и остаточная намагниченность зависят и от способа приготовления материала, и от направления, вдоль которого определяются эти параметры. В табл. 8.2 суммированы данные об основных материалах, применяющихся при изготовлении экранированных комнат.

Для экранирования от постоянного электрического поля (электростатического экранирования) достаточно покрыть экранируемый объем тонким слоем проводящего материала (фольгой или краской). Независимо от силы и конфигурации электрического поля вне экранированного объема поле внутри него будет равно нулю. Более века назад Фарадей использовал этот факт для демонстрации квадратичной зависимости поля от расстояния. Единственное, что требуется при создании электростатического экрана,– это полностью заключить экранируемый объем в проводящую оболочку. Для этого нужно конструировать двери, обеспечивающие непрерывность оболочки, и специальные вводы и арматуру для кабелей, которые идут внутрь экранируемого пространства. При экранировании очень сильных полей необходимо принимать меры против возникновения электрического пробоя по воздуху. На наружной поверхности экрана по возможности не должно быть заострений, и она не должна быть покрыта диэлектрическими материалами.

Таблица 8.2. Физические свойства некоторых металлов, применяющихся при изготовлении экранов (Weast, 1973)

Материал	Начальная проницаемость	Удельное сопротивление, мкОм·см	Остаточная намагниченность	Стоимость
Мю-металл (листовой)	20 000	62	Низкая	Высокая
Железо высокой чистоты (листовое)	5000	10	Высокая	Низкая
Пермалой (листовой)	2500	45	»	Высокая
Никель	600	7,8	?	»
Алюминий	1	2,8	—	Низкая
Медь	1	1,7	—	»
Серебро	1	1,6	—	Очень высокая

Экранирование от переменных электрического и магнитного полей высокой частоты (электромагнитное экранирование) осуществляют с помощью толстого слоя проводящего материала, обычно меди или алюминия. В соответствии с законом индукции переменное поле индуцирует в проводнике токи, порождающие в свою очередь поле, которое компенсирует поле, вызвавшее их. Электрическое и магнитное поля частоты f спадают внутри проводящего материала экспоненциально с расстоянием от его поверхности, т. е. амплитуда поля уменьшается в 2,718 раз на толщине скин-слоя δ, определяемой формулой

$$\delta = (\rho/\pi\mu_0\mu f)^{1/2},$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление, μ – магнитная проницаемость, $\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная. Для такого проводника, как медь, $\delta = 0{,}85$ см при $f = 60$ Гц и $\delta = 0{,}06$ см при $f = 10^4$ Гц. Таким образом, медный экран толщиной 1 см будет ослаблять поле частотой 10^4 Гц более чем в 10^5 раз, а поле частотой 60 Гц – всего примерно в три раза. Для более полного экранирования компоненты поля частотой 60 Гц требуется значительно более толстый слой меди

или экран из ферромагнитного материала с большой проницаемостью. При проектировании электромагнитного экрана нужно учитывать предполагаемый спектр частот внешних полей с тем, чтобы толщина экрана была достаточна для получения нужного коэффициента экранирования по всем частотам.

При электромагнитном экранировании, как и при электростатическом, желательно, чтобы в экранирующей оболочке не было отверстий и щелей, препятствующих протеканию индукционных токов. Ясно, что комната, сконструированная с учетом этих рекомендаций, будет обеспечивать как электромагнитное, так и электростатическое экранирование.

Для экранирования от магнитных полей низкой частоты (динамическое магнитное экранирование) используются многослойные оболочки из материала с очень высокой магнитной проницаемостью, чаще всего из мю-металла или пермалоя (Wills, 1899; Jackson, 1962). К магнитным свойствам материала для такого экрана предъявляются такие же требования, как и к материалу, из которого изготавливают трансформаторы,– это большая магнитная проницаемость при возможно меньшей остаточной намагниченности. В отличие от электростатического и электромагнитного экранирования для динамического магнитного экранирования весьма существенной становится геометрия экрана, о которой пойдет речь ниже. Вместо экранов из материалов с высокой проницаемостью последнее время для динамического экранирования иногда используют систему активной компенсации магнитного поля в рабочем объеме, состоящую из катушек Гельмгольца, датчика поля и цепи обратной связи. Размер рабочего объема в такой системе значительно меньше максимального размера катушек. Необходимость использования специальных датчиков и значительная стоимость ограничивают применимость таких систем для работы с большими объемами.

Экраны четвертого типа предназначены для экранирования от постоянной составляющей магнитного поля. Этим так называемым магнитостатическим экранам и посвящена в основном данная глава. Поскольку эффективное динамическое экранирование обеспечивает хорошее экранирование и от постоянного поля, их редко рассматривают по отдельности. Однако различия в требованиях к конструкции и к материалам для этих типов экранирования все же существуют, и их важно понимать. Вообще говоря, магнитостатическое экранирование может быть достигнуто как с помощью системы катушек Гельмгольца, так и путем использования магнитного материала, обладающего постоянной намагниченностью. Для экранирования больших объемов второй способ, по-видимому, более предпочтителен. Материал для такого экрана должен обладать большой и стабильной остаточной намагниченностью; кроме того, он должен быть легкодоступен. Этим требованиям удовлетворяет электротехническая трансформаторная сталь.

2.2. Экранирование от постоянного магнитного поля с помощью материалов, обладающих остаточной намагниченностью

Как это ни парадоксально, материал, обладающий «постоянной» намагниченностью, может использоваться для изготовления магнитных экранов. В самом деле, как показано ниже, с помощью только одного листа подобного магнитного материала можно достичь экранирующего эффекта, расположив этот лист должным образом. Даже ориентируя один магнитный диполь так, чтобы его потенциальная энергия во внешнем поле была минимальна, нетрудно скомпенсировать поле в некоторых точках пространства.

Потенциальная энергия U магнитного диполя с моментом $\mathbf{M}$ в поле $\mathbf{B}_0$ равна

$$U = -\mathbf{M}\cdot\mathbf{B}_0,$$

так что ее минимум достигается, когда момент направлен вдоль поля. Магнитное поле в точке с радиусом-вектором $\mathbf{r}$, создаваемое диполем, расположенным в начале координат, задается формулой

$$\mathbf{B}_d = \frac{\mu_0}{4\pi}\left[\frac{3(\mathbf{M}\cdot\mathbf{r})\mathbf{r} - r^2\mathbf{M}}{r^5}\right]. \qquad (1)$$

Таким образом, в экваториальной плоскости диполя, где $\mathbf{M}\cdot\mathbf{r} = 0$, на расстоянии $r_0 = (\mu_0 M/4\pi B_0)^{1/3}$ от него поле диполя $\mathbf{B}_d$ полностью компенсирует внешнее поле $\mathbf{B}_0$ (рис. 8.2).

Для нескольких диполей конфигурация состояния, обладающего минимальной энергией, вообще говоря, зависит от внешнего поля. Например, взаимодействие между двумя диполями с моментами $\mathbf{M}_1$ и $\mathbf{M}_2$, находящимися на расстоянии $\mathbf{r}_{12}$ друг от друга, даст вклад в потенциальную энергию, равный

$$U_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi}\left[\frac{r_{12}^2\,\mathbf{M}_1\cdot\mathbf{M}_2 - 3(\mathbf{M}_1\cdot\mathbf{r}_{12})(\mathbf{M}_2\cdot\mathbf{r}_{12})}{r_{12}^5}\right].$$

Если внешнее магнитное поле направлено вдоль вектора $\mathbf{r}_{12}$, то минимальной энергии всегда соответствует состояние с моментами обеих диполей, параллельными полю. Если же поле, например, перпендикулярно $\mathbf{r}_{12}$, то в сильных полях моменты выстраиваются вдоль поля,

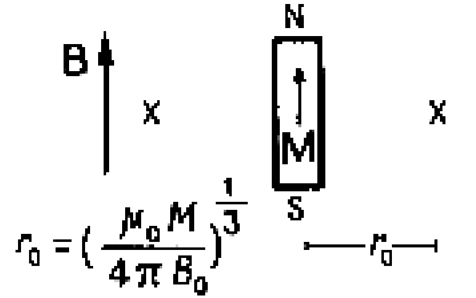


Рис. 8.2. Магнитный диполь с моментом $\mathbf{M}$, направленным вдоль внешнего поля $\mathbf{B}_0$, создает в своей экваториальной плоскости на расстоянии r_0 поле, в точности компенсирующее внешнее.

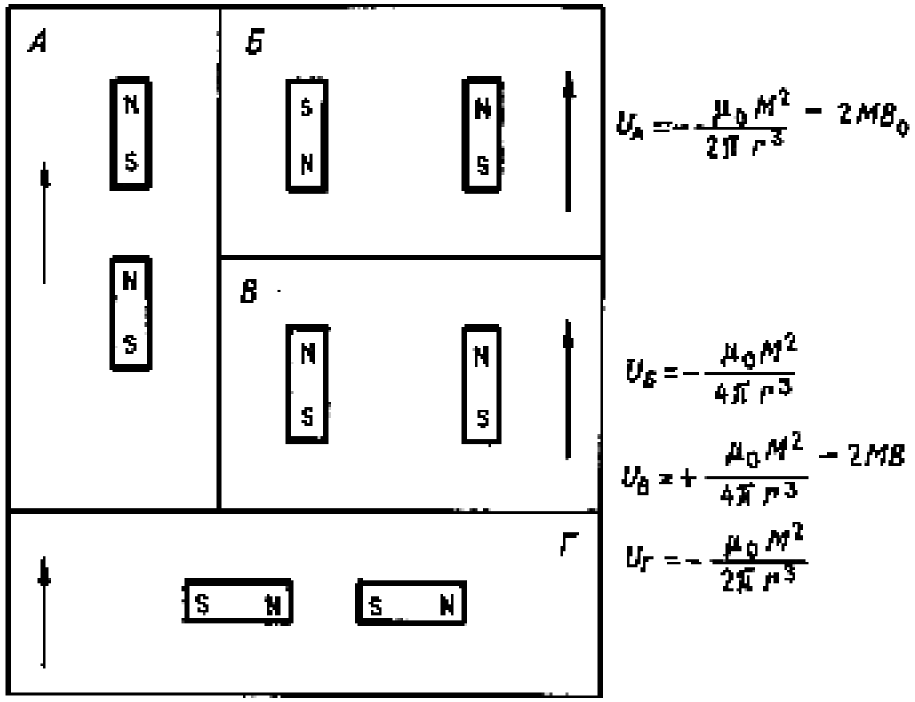


Рис. 8.3. Четыре возможных расположения двух магнитных диполей во внешнем поле B_0 (оно обозначено стрелками, направленными вверх). Система с конфигурацией *А* в поле любой величины находится в энергетически наиболее выгодном состоянии. Если диполи, расположенные так, как это показано на рис. *Б*, *В*, *Г*, могут находиться в одной из нескольких равновесных ориентаций, то в больших полях наиболее энергетически выгодна конфигурация *В*, а в малых – конфигурация *Г*. Если же направление моментов диполей задано и совпадает с направлением внешнего поля, как на рис. *Б* и *В*, то в малых полях меньшей энергией обладает конфигурация *Б*. Справа приведены выражения для потенциальной энергии указанных конфигураций диполей. *r* – расстояние между диполями.

а для меньших полей энергетически более выгодными оказываются конфигурации, когда моменты диполей антипараллельны друг другу (рис. 8.3, Б) или перпендикулярны полю (рис. 8.3, Г).

Качественно такие же результаты получаются и для тонких листов намагниченного материала: если лист намагничен таким образом, что магнитные моменты всех доменов лежат в плоскости листа, то на небольшом расстоянии от его поверхности поле будет почти постоянно и направлено навстречу вектору намагниченности (рис. 8.4). Провести точные вычисления в этом случае довольно сложно. С помощью формулы (1) можно сравнительно просто рассчитать поле тонкого диска, имеющего радиус *R*, толщину *t* и намагниченность J, лежащую в плоскости диска. Поле на оси этого диска на расстоянии *r* от его центра равно

$$\mathbf{B} = -\frac{\mu_0}{4}\frac{R^2 t}{(R^2 + r^2)^{3/2}} J. \qquad (2)$$

Легко видеть, что при $r \ll R$ поле почти постоянно, а при очень

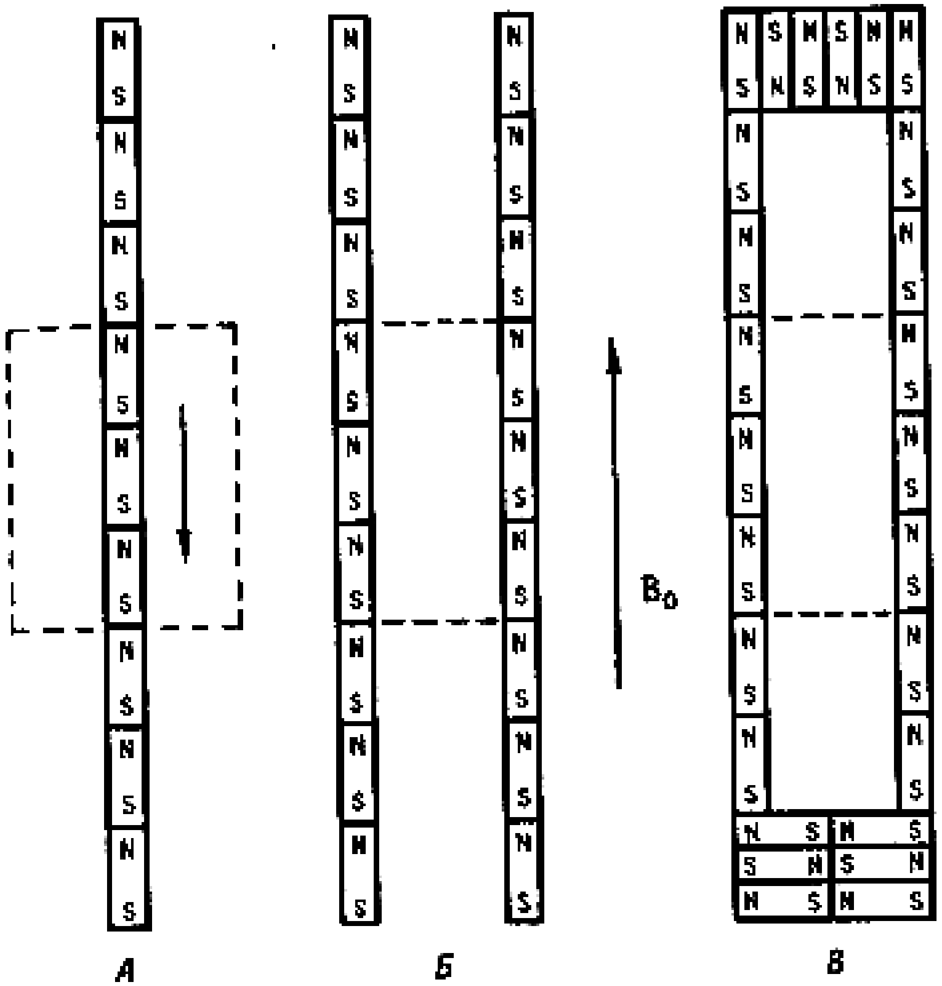


Рис. 8.4. Магнитное поле плоскости (*А*), образованной магнитными диполями, направлено навстречу моментам этих диполей и примерно постоянно в центре плоскости (область, обведенная пунктирной линией). Во внешнем поле $\mathbf{B}_0$ магнитные моменты доменов ориентируются вдоль поля, и в центральной части пространства между двумя намагниченными плоскостями (*Б*) поле плоскостей частично компенсирует внешнее поле. Магнитные моменты доменов дна и крышки «коробки» (*В*) не могут выстраиваться вдоль поля так же легко, как моменты доменов стенок, поэтому дают малый вклад в экранирование.

большом *R* стремится к нулю, и это последнее обстоятельство несколько неожиданно.

Приведенные формулы позволяют оценить коэффициент экранирования *S* в окрестности диска из магнитного материала, обладающего намагниченностью, обусловленной только проницаемостью μ. Предположим, что плоскость диска параллельна полю Земли $\mathbf{B}_0$. Намагниченность **J** материала во внешнем поле $\mathbf{B}_{out}$, параллельном поверхности диска, определяется соотношением

$$\mathbf{J} = \frac{\mu - 1}{\mu_0}\mathbf{B}_{out}. \qquad (3)$$

Поле $\mathbf{B}_{out}$ представляет собой сумму поля Земли $\mathbf{B}_0$ и направленного

навстречу ему поля магнитного момента диска, т.е. вблизи центра диска, где $r \simeq 0$,

$$\mathbf{B}_{out} = \mathbf{B}_0 - \frac{\mu_0 \mathbf{J}\, t}{4R}. \qquad (4)$$

Из равенств (3) и (4) можно найти коэффициент экранирования S, точнее коэффициент компенсации внешнего поля полем диска:

$$S = B_0 / B_{out} = 1 + \frac{(\mu - 1)\, t}{4R}. \qquad (5)$$

Это, конечно, приближенный результат, поскольку мы предполагали, что намагниченность диска однородна и везде равна намагниченности в центре.

Итак, ясно, как с помощью одного-двух параллельных плоских листов магнитного материала можно экранировать магнитное поле, лежащее в их плоскости (рис. 8.4). В случае двух листов область с наименьшим полем находится между ними, при этом экранирующий эффект не зависит от того, замкнут экран или нет. Листы, замыкающие объем, дают лишь малый вклад в экранировку, поскольку домены в них с трудом ориентируются вдоль внешнего магнитного поля (рис. 8.4). Однако такие листы защищают от полей рассеяния, возникающих на краях основных экранирующих листов.

Ограниченность приведенного рассмотрения, а также работ Wills, 1899 и Jackson, 1962 состоит в том, что они не учитывают наличия у реальных магнитных материалов остаточной намагниченности, вклад которой неотличим от вклада, связанного с магнитной проницаемостью

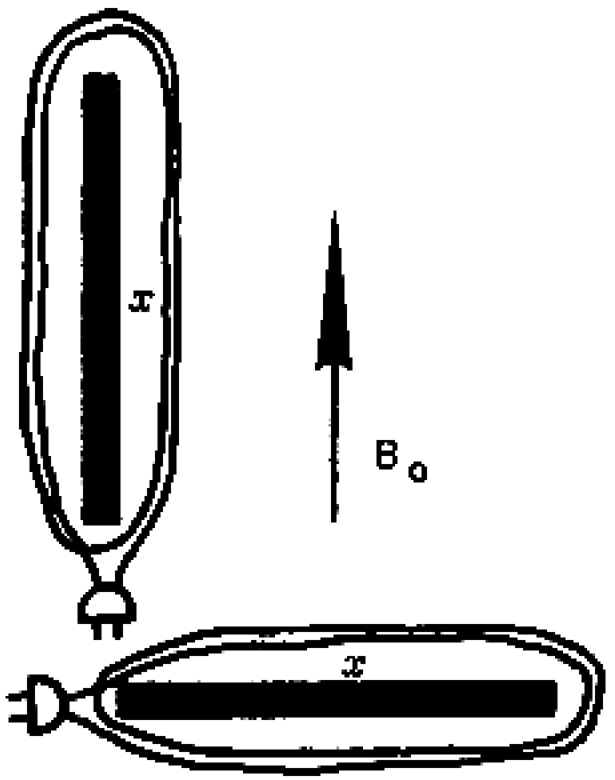


Рис. 8.5. Результат размагничивания листа трансформаторной стали путем пропускания его через катушку, в которой течет переменный ток, сильно зависит от расположения листа по отношению к вектору геомагнитного поля $\mathbf{B}_0$. Когда плоскость листа параллельна $\mathbf{B}_0$, поле вблизи центра листа (в точке x) будет составлять несколько процентов от $\mathbf{B}_0$, т. е. возникает эффект экранирования. Если же плоскость листа перпендикулярна $\mathbf{B}_0$ в процессе размагничивания, то экранирование почти не наблюдается.

материала. Ситуация осложняется еще и тем, что остаточная намагниченность зависит от предыстории материала, а проницаемость μ – от частоты и напряженности внешнего поля.

Чтобы продемонстрировать, какой экранирующий эффект дает лист трансформаторной стали, был поставлен следующий простой эксперимент (рис. 8.5). Мы расположили прямоугольный лист размерами 66 × 71 × 0,062 см так, чтобы поле Земли было параллельно его плоскости, и размагничивали лист путем протягивания через отверстие катушки с обмоткой из 200 витков медного провода, через которую шел переменный ток частотой 60 Гц, создававший поле изменяющейся полярности (рис. 8.6). Ток был достаточно силен, чтобы в поле катушки могло происходить перемагничивание за счет перестройки доменной структуры, но по мере удаления размагничивающей катушки поле постепенно спадало до нуля. Благодаря такой процедуре доменная структура листа приходит в состояние с минимальной энергией в магнитном поле Земли.

Описанный эксперимент был проведен нами недавно в Лаборатории Вудвард-Клайд в Окленде. Поле вблизи центра листа оказалось равным 1 500 нТл, в то время как поле Земли в месте проведения эксперимента составляло около 50 000 нТл, т.е. коэффициент экранирования был равен примерно 35.

Затем поле вблизи центра листа измерялось в экранированной комнате с тем, чтобы оценить вклад остаточной намагниченности. Это поле оказалось равным 4 500 нТл и направленным противоположно полю Земли в процессе размагничивания. Таким образом, вклад остаточной намагниченности составлял всего около 10%, и отсюда следует, что для эффективного экранирования не нужен замкнутый объем.

Если повторить весь эксперимент, расположив лист так, чтобы его плоскость была перпендикулярна полю Земли, то поле в центре листа, измеренное вне экранированной комнаты, составит 50 000 нТл, т.е. при такой ориентации никакого экранирующего эффекта наблюдаться не будет. Если же повторить ту же процедуру внутри экранированной комнаты, то поле вблизи центра листа будет примерно равно полю в комнате, т.е. 100 нТл. Все это свидетельствует о зависимости намагниченности от предыстории материала.

Поскольку проекции вектора на две ортогональные плоскости полностью задают этот вектор, то, вообще говоря, только два набора таких поверхностей обеспечивают достаточное экранирование. Однако в простейшем случае можно ограничиться лишь двумя стенками, расположенными в соответствии с магнитным склонением. Такая конструкция непрактична, но иллюстрирует общий принцип, по которому для экранирования данной компоненты поля наиболее важны плоскости, параллельные ей. Так, в экранирование геомагнитного поля наибольший вклад вносят восточная и западная стенки, а северная и южная играют меньшую роль.

В теоретических работах по экранированию (см., например, Wills,

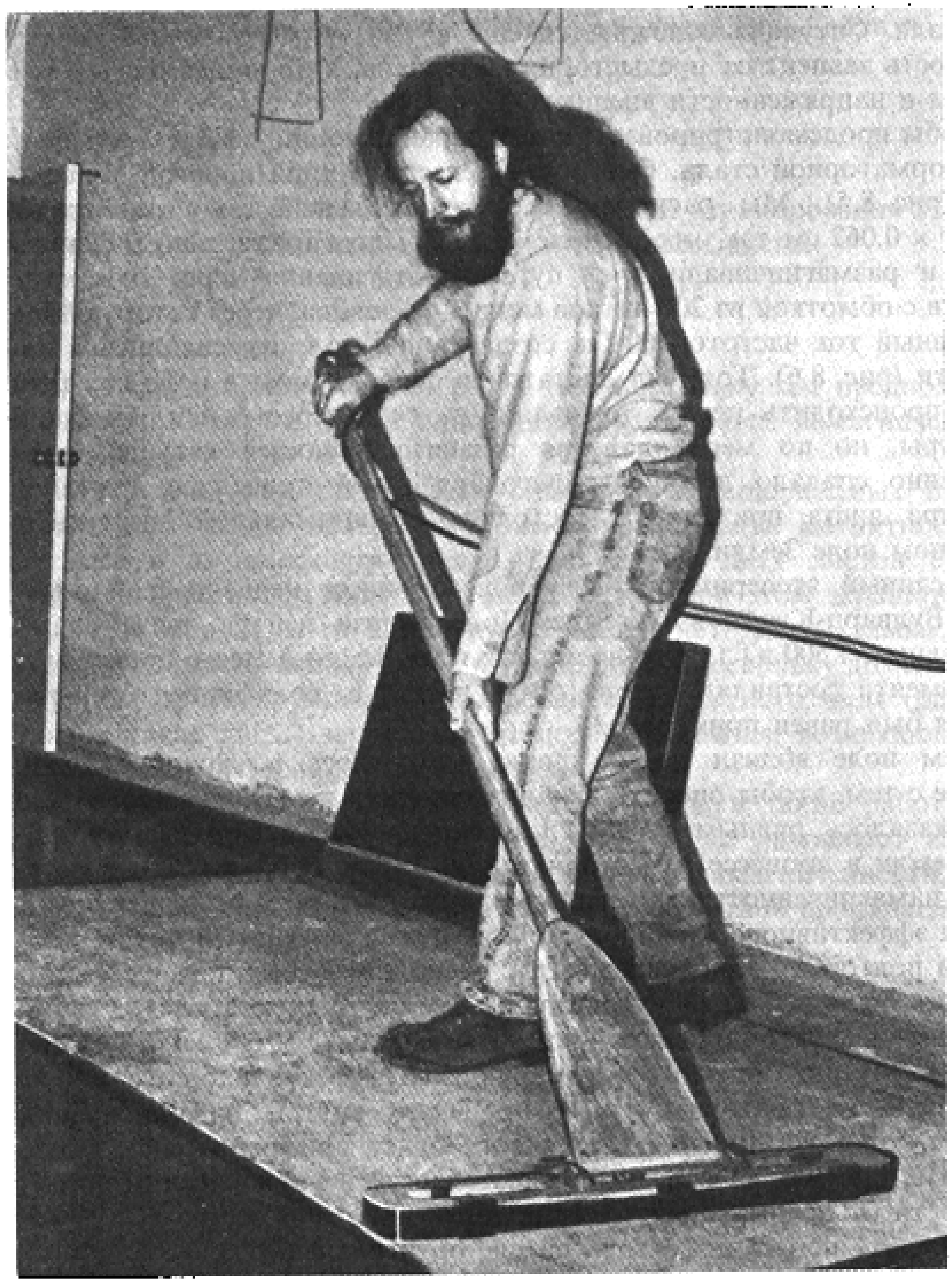


Рис. 8.6. Размагничивание листа трансформаторной стали с помощью большой переносной катушки. Эта же катушка использовалась для перемагничивания листов после сборки экранированной комнаты. Обмотка катушки состоит из 200 витков медной проволоки 18-го калибра и подключается к сети переменного тока с напряжением 120 В. Для размагничивания труднодоступных мест комнаты применялись переносные катушки меньших размеров.

1899) не учитываются остаточная намагниченность и зависимость от магнитного поля магнитной проницаемости, которая значительно уменьшается при малых полях (рис. 8.7) из-за того, что падает доля

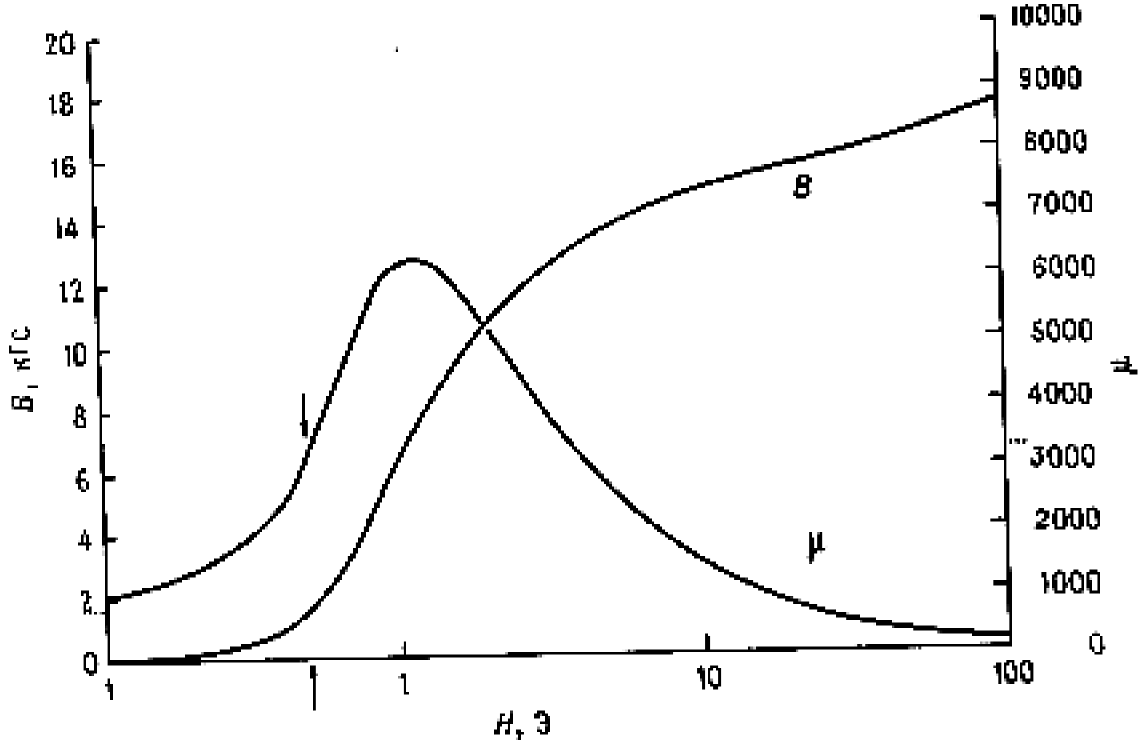


Рис. 8.7. Зависимость индукции B и восприимчивости μ от внешнего поля H для трансформаторной стали 24-го калибра марки M22, FP, применявшейся одним из авторов для обшивки экранированных комнат. Стрелками указано примерное значение напряженности геомагнитного поля (0,5 Э). Данные представлены фирмой-изготовителем (U.S. Steel).

магнитных доменов, моменты которых ориентированы вдоль поля. Известно (см., например, Kittel, 1966), что эта доля определяется функцией Ланжевена $L(\alpha) = \mathrm{cth}(\alpha) - 1/\alpha$, аргумент которой равен отношению магнитной потенциальной энергии домена MB к тепловой энергии kT, т.е. $\alpha = MB/kT$. При уменьшении B функция $L(\alpha)$ стремится к нулю и соответственно проницаемость μ падает. Таким образом, используя формулы, приведенные в работах Wills, 1899 и Patton, 1967 для расчета многослойных экранов, нужно учитывать, что все слои находятся в разных внешних полях и вследствие этого имеют разные значения проницаемости.

То обстоятельство, что расчеты экранов в довольно грубом приближении дают сравнительно хорошие результаты, может показаться счастливой случайностью. К тому же возникает вопрос: почему не происходит перекомпенсации экранируемого поля, т.е. почему поле внутри экрана не может иметь направления, противоположного внешнему полю? К сожалению, в рамках этой главы мы не можем дать количественные ответы на эти вопросы.

Однако качественно можно объяснить, почему характеристики правильно изготовленных экранированных комнат соответствуют приближенным расчетам. Доменная структура материалов с высокой проницаемостью и малой остаточной намагниченностью легко перестраивается в соответствии с локальным направлением поля. В таких ма-

териалах, как трансформаторная сталь, доменная структура не столь подвижна, особенно в малых полях. Но даже небольшие воздействия, например постукивание, нагревание или наложение переменного поля размагничивающей катушки (рис. 8.6), позволяют системе доменов перейти в состояние с минимальной энергией, т. е. состояние, в котором она находилась бы, если бы материал был очень магнитно-мягким и не обладал остаточной намагниченностью. Таким образом, материалы с остаточной намагниченностью могут вести себя при экранировании подобно материалам без остаточной намагниченности и с большой проницаемостью.

Этим же объясняется и тот факт, что в случае специально подготовленных материалов достигается более высокая степень экранирования, чем следует из формул типа (5) и из измерений проницаемости. При таких измерениях обычно регистрируется только проницаемость, соответствующая подвижной подсистеме доменов. А поскольку в процессе подготовки материала под внешним воздействием перестраиваются почти все домены, а не только самые подвижные, то и эффективная проницаемость будет выше измеренной обычным способом. Так, в описанном ранее эксперименте с листом трансформаторной стали размерами 66 × 71 × 0,062 см мы получили коэффициент экранирования около 35, в то время как по спецификации изготовителя (рис. 8.7) в поле, равном полю Земли, эта сталь имеет проницаемость $\mu = 3000$, так что расчет по формуле (5) дает коэффициент экранирования, равный 2,5. Такие же различия наблюдались и для внешних слоев экранированной комнаты в Окленде. Приближенная формула Пэттона (Patton, 1967) для коэффициента экранирования S, получаемого с помощью листа с проницаемостью μ, толщиной t и максимальным размером L, имеет вид

$$S = 1 + 1{,}34\mu t/L.$$

Отсюда при $t = 0{,}124$ см, $L = 3{,}0$ м и $\mu = 3000$ (трансформаторная сталь в поле Земли, равном 50 000 нТл, рис. 8.7) получаем $S = 2{,}7$. Измеренный сразу после изготовления этой комнаты коэффициент экранирования S оказался равен 6, поле внутри комнаты при этом было равно 8 500 нТл. После механического воздействия (постукивания молотком по стенкам) внутреннее поле упало до 2 900 нТл, что соответствует эффективному значению проницаемости 28 000, существенно превосходящему все величины, полученные при непосредственных ее измерениях. Это еще раз указывает на очень важную роль эффектов остаточной намагниченности при использовании трансформаторной стали для экранирования.

3. Конструирование магнитоэкранированных комнат

Многие из обсуждавшихся в этой главе приемов конструирования и изготовления магнитных экранов уже использовались другими экспериментаторами. Так, о возможности создания эффективных экранов из

тонких листов электротехнической стали сообщалось в работе Patton, 1967. Мы чаще всего используем двухслойный экран с расстоянием между слоями 25–30 см. Каждый слой состоит из двух наложенных друг на друга листов трансформаторной стали толщиной 0,062 см, так что общая толщина слоя составляет 0,124 см. Коэффициент экранирования мы обычно оцениваем по формулам, приведенным в работе Patton, 1967. Каркас комнаты изготавливаем из дерева, но при этом всегда заботимся о том, чтобы и остальные детали конструкции были немагнитны, естественно, за исключением самой экранирующей стальной обшивки. Например, каркас мы сколачиваем алюминиевыми гвоздями, а листы привинчиваем друг к другу и к каркасу латунными винтами.

Некоторым приемам мы следуем традиционно, а не потому, что это необходимо для получения высокого качества экранирования. Так, мы обычно размагничиваем инструмент (отвертки, пилы и т. п.) перед тем, как пользоваться им внутри экранированной комнаты, и всегда кладем его на деревянный стол или ящик, а не на пол, хотя локальную намагниченность, возникающую в процессе изготовления комнаты, впоследствии можно ликвидировать с помощью катушки для размагничивания.

В этом разделе мы обсудим некоторые особенности конструкций экранированных комнат (например, двери и соединения), которые отличаются от предлагавшихся другими авторами (Patton, 1967). Кроме того, мы рассмотрим, например, учет магнитных условий в предполагаемом месте размещения экрана перед возведением экранированной комнаты, описание которых редко встречается.

3.1. Учет магнитных условий

Чтобы обеспечить наилучшие условия функционирования магнитного экрана, необходимо предварительно тщательно проанализировать магнитную обстановку в месте его расположения. Кроме общих характеристик магнитного поля (направления и напряженности) следует учесть его пространственные и временны́е вариации. Магнитное поле внутри больших зданий часто бывает весьма неоднородно из-за наличия стальных конструкций и трубопроводов. Если эти градиенты поля достаточно велики и распространяются на обширные области, они могут сильно ухудшить качество экранирования. Градиенты, обусловленные остаточной намагниченностью магнитных деталей, часто можно уменьшить путем размагничивания переменным полем переносной катушки. При этом прямые трубы или другие конструкции, расположенные в направлении восток–запад, легко размагничиваются до приемлемого уровня, а ориентированные с севера на юг создают помехи, особенно на сгибах и других неоднородностях. Поэтому вблизи мест с большим градиентом рекомендуется удваивать (или даже утраивать) толщину экранирующего материала и стараться не делать отверстий в экране. Опыт показывает, что магнитные экраны значительно эффек-

тивнее уменьшают однородное поле, чем его градиенты. Следует также помнить, что источником магнитных полей может служить само лабораторное оборудование.

При экранировании нужно учитывать и временны́е вариации поля. Поскольку экранирующее действие обычно применяемых материалов связано в основном со сравнительно устойчивыми доменами, то экраны из таких материалов оказываются менее эффективными, если поле меняется во времени. Подобные поля часто создаются движущимися магнитными предметами, например транспортными средствами, некоторыми видами лабораторного оборудования, лифтами. Чтобы избавиться от подобных помех, лучше всего располагать экранированную комнату там, где их уровень минимален. В этом случае следует учитывать любую информацию о движении всевозможных объектов вблизи экрана.

Если все-таки локальное магнитное поле в месте расположения экрана существенно изменяется, то иногда приходится перемагничивать магнитостатический экран переносной катушкой с учетом новой конфигурации поля. Для этого необходимо иметь свободный доступ к поверхности экрана, причем не только ко внутренним его слоям, но и ко внешним, обработка которых необходима при сильных изменениях внешнего поля.

3.2. Отверстия, входы

Проблема доступа касается всех типов экранов, и ее решения существенно различаются в зависимости от их назначения. В случае электромагнитных экранов необходимы плотно закрывающиеся двери, у которых отсутствуют щели по периметру проема. Такая конструкция дверей подходит и для магнитных экранов, однако она налагает излишние ограничения на устройство остальных частей экрана. Более гибкое решение можно найти, рассматривая особенности работы магнитного экрана и сравнивая магнитостатическое и электромагнитное экранирование.

Две важные для электромагнитного экрана особенности – наличие двери и возможность «электрически» плотно ее закрыть – вовсе не необходимы при магнитостатическом экранировании (см., например, рис. 8.8). Различаются и материалы, применяющиеся для изготовления двух указанных типов экранов: это материалы с высокой проводимостью, с одной стороны, и ферромагнитные материалы – с другой (табл. 8.2); совершенно различна и симметрия физических явлений, лежащих в основе их действия. При электромагнитном экранировании наибольший эффект достигается, когда направление распространения электромагнитной волны перпендикулярно поверхности листа проводящего материала, в котором образуются индукционные токи, приводящие к сильному затуханию волны в экране. Параллельно поверхности листа волна распространяется с очень малым затуханием.

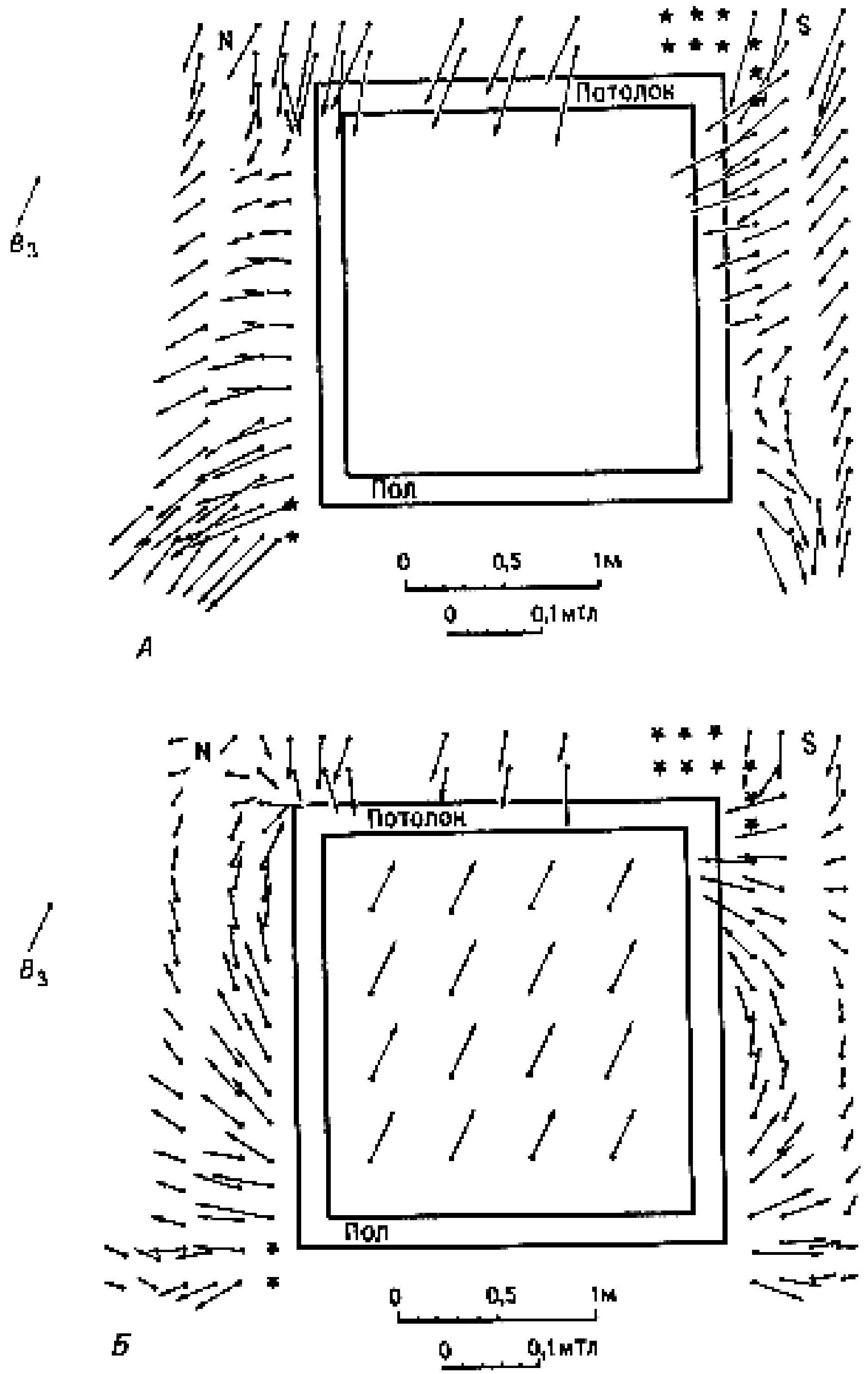


Рис. 8.8. Вертикальное сечение в направлении север – юг экранированной комнаты, сконструированной в Техасском университете и расположенной в Галвестоне. Комната имела форму куба с длиной ребра 2,1 м; экранирование осуществлялось с помощью листов из μ-металла. *А*. Распределение магнитного поля вне экрана. *Б*. Распределение магнитного поля, создаваемого самим экраном, полученное из распределения рис. *А* путем вычитания в каждой точке магнитного поля Земли $B_з$ = 46 500 нТл, имеющего склонение 6° и наклонение 65° (стрелка в левой части рисунков). Звездочками отмечены точки, в которых поле превышало 0,1 мТл (рис. 8.8,*А*) и 0,05 мТл (рис. 8.8,*Б*). Обратите внимание на то, что самые сильные изменения напряженности и направления поля наблюдаются вблизи ребер экрана.

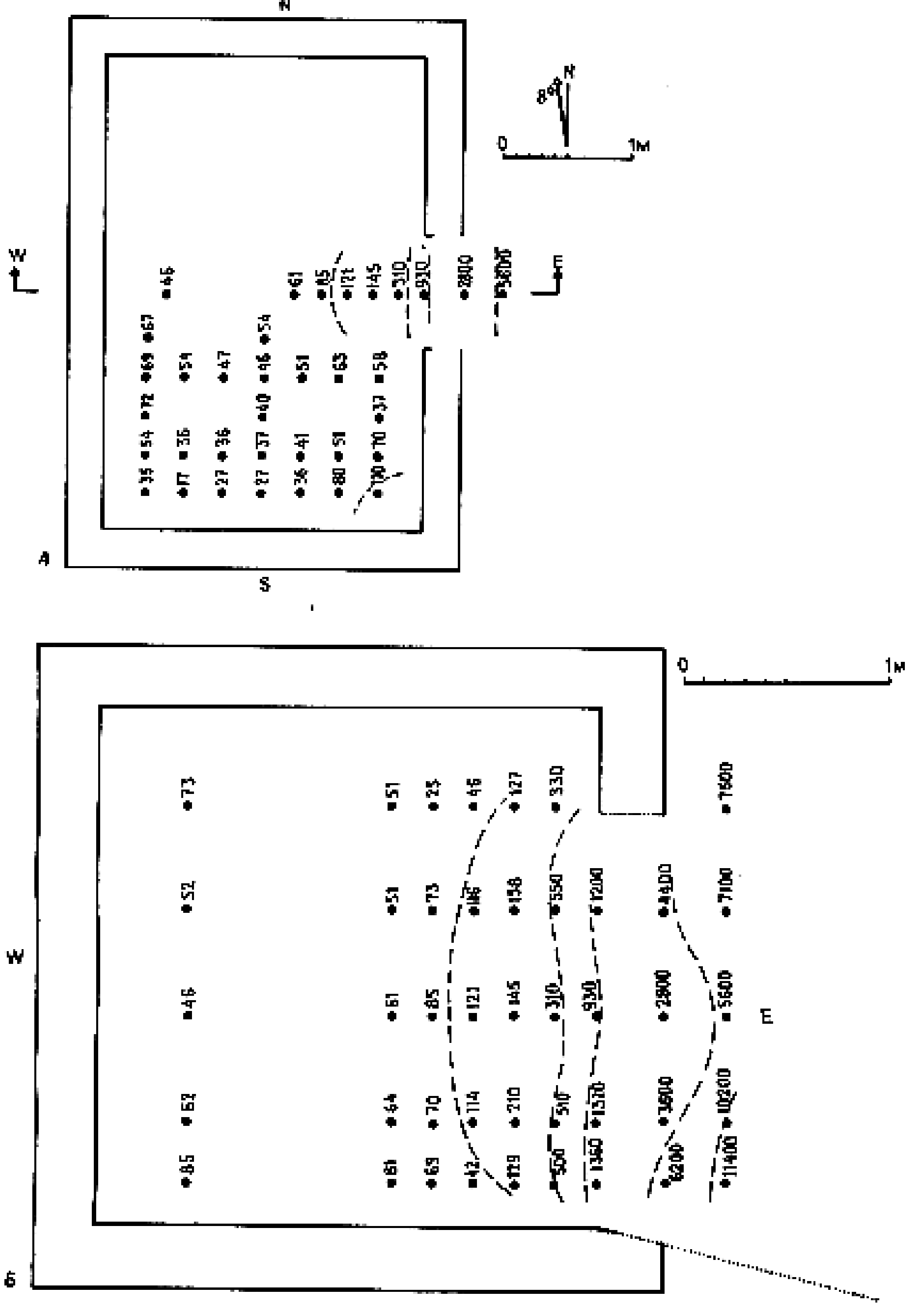


Рис. 8.9. Горизонтальное (*А*) и вертикальное (*Б*) сечения экранированной комнаты, сконструированной в Институте наук о Земле и расположенной в Тайпее (Тайвань). Числа рядом с точками – индукция поля (в нТл) через 5 сут. после возведения экрана. Пунктирные кривые – линии равной индукции (100, 500, 1000 и 5 000 нТл). До постройки комнаты геомагнитное поле на месте ее расположения было равно 35 800 нТл и имело склонение 8° и наклонение 38°. Место сечения указано на рис. *А* угловыми стрелками. Обратите внимание на то, что большие градиенты поля наблюдаются только у дверного проема.

При магнитостатическом экранировании для получения эффекта достаточно, чтобы вектор экранируемого поля лежал в плоскости листа, и эффект наблюдается по обе стороны листа. Все эти различия и определяют подходы к проектированию расположения отверстий в рассматриваемых типах экранов.

Мы создали несколько достаточно эффективных магнитостатических экранов, в которых вход вообще никак не закрывался (см., например, рис. 8.9). В соответствии со сказанным выше отверстие в экране следует располагать в том месте, где силовые линии магнитного поля пересекают поверхность, ограничивающую экранируемый объем, в направлении, по возможности близком к перпендикулярному, поскольку такой участок меньше всего влияет на эффективность экрана как целого. Однако при этом следует иметь в виду два обстоятельства. Во-первых, в указанной области постоянное поле довольно велико (см., например, рис. 8.8). Так, у нижнего северного и верхнего южного наружных ребер экранированной комнаты, созданной фирмой Woodward-Clyde, поле более чем в четыре раза превышало поле Земли в этом месте, т.е. составляло около 200 000 нТл. Это и приводит к необходимости располагать плоскость отверстий перпендикулярно внешнему полю – только в этом случае поле будет плавно уменьшаться при подходе к экрану снаружи. Наш опыт полностью подтверждает этот вывод.

Во-вторых, экран сам создает довольно большие поля и их градиенты вблизи неоднородностей поверхности, таких, например, как ребра комнаты (рис. 8.8, *Б*). Если в таком месте сделать отверстие, то значительная часть внешнего поля или поля, создаваемого самим экраном, которое ранее экранировалось удаленной частью поверхности, проникнет в органичиваемый ею объем. Конечно, в экранах очень больших размеров, вытянутых в направлении внешнего поля, все эти трудности можно обойти, работая только в центре комнаты (Wikswo, 1975). Но наиболее практичным выходом из положения представляется все же создание полностью замкнутой оболочки, обеспечивающей защиту как от больших полей, так и от создаваемых самим экраном градиентов.

Таким образом, можно сформулировать два общих правила выбора места для отверстий в экране: 1) отверстие нужно делать в поверхности, перпендикулярной магнитному полю; 2) отверстие должно находиться на возможно большем расстоянии от неоднородностей на поверхности экрана.

3.3. Соединения, углы, края листов

В имеющихся руководствах по конструированию экранов (Patton, 1967; Thomas, 1968) обращается особое внимание на качество соединений между листами экрана. Для электромагнитного экранирования характер этих соединений весьма существен, при магнитостатическом же экранировании достаточно простого перекрывания листов ферромагнитного

материала. В наших конструкциях перекрывание обычно составляет 5 см, а два листа, образующие слой экранирующего материала, мы скрепляем прочными латунными скрепками с расстоянием между ними 15–20 см. При наличии дополнительного фанерного или гипсового покрытия это расстояние может быть увеличено до 25 см и более. Указанные степень перекрывания листов и расстояние между скрепками выбраны с запасом. Соединения с перекрыванием в 1 см были не менее эффективны, и их также нельзя было обнаружить с помощью магнитных методов. Правда, на участках с большими полями они все-таки проявлялись, но на расстоянии не более 10 см.

Наша конструкция угловых деталей проста и эффективна. Стальные листы экрана мы сгибаем под прямым углом с помощью специального приспособления, сделанного из немагнитных материалов: твердых пород дерева, фанеры, нержавеющей стали или алюминия. Так как экран везде состоит из двух слоев стали, то угловыми листами закрываются все ребра куба, открытыми остаются только вершины. Края листов внутреннего слоя вокруг больших отверстий, таких как вход, отгибаются наружу примерно на 10 см. Это позволяет в какой-то степени отвести от экранируемого пространства большие поля, возникающие на краях листов.

Изготовление и размагничивание наружного слоя экрана должно быть по возможности закончено до начала установки внутреннего слоя. Угловые листы внутреннего слоя подготавливают на специальном приспособлении, помещенном в частично экранированную комнату, где поле уже значительно ослаблено ($B = 3000$ нТл). Это позволяет существенно уменьшить намагниченность деформированных участков, имеющих большую коэрцитивную силу.

3.4. Обработка листов

В качестве экранирующего материала мы использовали электротехническую сталь 24-го калибра (толщина 0,62 мм) M-22, FP (fully processed – полностью обработанная), CP-3 (core plate – листовая), выпускаемую фирмой U.S. Steel. Эта сталь намагничивается до насыщения в поле $H_s = 400$ Э и поставляется в виде ленты, смотанной в рулоны шириной 107 см. Из ленты мы нарезали листы размерами 66 × 132 или 91 × 132 см. Удельная масса применявшихся листов 11,84 кг/м^2.

Перед установкой листы размагничивали с тем, чтобы устранить остаточную намагниченность, возникающую при разрезании и обработке. Для этого мы применяли большую переносную катушку, генерирующую поле амплитудой 15 мТл и частотой 60 Гц (рис. 8.6). Положение листа по отношению к направлению поля в лаборатории специально выбиралось так, чтобы при удалении размагничивающей катушки он намагничивался определенным образом. Намагниченность, приобретаемую при этом материалом, обычно называют идеальной остаточной намагниченностью (ARM; см. гл. 2). Чаще всего мы располагали листы вдоль магнитного поля на столе с наклоном, равным магнитному наклонению, хотя, вообще говоря, можно проводить размагничивание и в других положениях, в том числе и таких, при которых поле перпендикулярно плоскости листа, что уменьшает остаточную намагниченность. Направление остаточной намагниченности каждого листа отмечалось и учитывалось во время сборки экрана. Сама процедура размагничивания состояла в пропускании листов через отверстие катушки, где переменное поле максимально и способно воздействовать даже на самые высококоэрцитивные домены, на которые та же катушка, подносимая к поверхности листа, при последующих размагничиваниях не действует.

3.5. Сборка экрана и размещение листов

Сборка комнаты, экранированной листами электротехнической стали, производится в последовательности, обеспечивающей максимальную простоту конструкции и легкий доступ ко всем поверхностям для проведения локального перемагничивания. Удобнее всего, конечно, когда листы не прилегают к стенам комнаты, так что затруднен доступ только к наружной поверхности пола. Но при отсутствии свободного места можно располагать экран и вплотную к стенам и потолку, при этом всю необходимую обработку материала следует проводить до того, как он будет закрыт последующими конструкциями. По возможности нужно стараться все же оставлять пространство между поверхностями экрана и комнаты, достаточное для работы с размагничивающей катушкой, поскольку это часто бывает необходимо и в процессе возведения экрана, и при тех или иных изменениях внешнего поля, возникающих, например, при перемещениях лабораторного оборудования и изменениях конфигурации арматуры.

При сборке экрана листы устанавливают так, чтобы направление ARM было максимально близко к направлению внешнего магнитного поля. Например, в месте с магнитным наклонением 60° ARM листов, экранирующих пол, должна быть направлена на север, а листов у северной и южной стен – вниз. Для восточной и западной стен наилучшим является такое расположение листов, когда ARM составляет 60° с горизонтальной плоскостью, однако, чтобы не усложнять конструкцию, достаточно направить ее вертикально вниз.

Сборка экрана обычно начинается с наружного слоя пола. Далее мы перемагничиваем эту часть экрана с помощью той же катушки, которая использовалась для первоначального размагничивания листов, перемещая ее по поверхности пола (рис. 8.6). В результате, по-видимому, около 80% намагниченности доменов переориентируется в вертикальном направлении перпендикулярно плоскости листа. После удаления катушки лист намагничивается в соответствии с величиной и направлением компоненты внешнего поля, лежащей в его плоскости. Далее мы производим сборку и перемагничивание наружного слоя экрана, причем

перемагничивание частей, доступ к которым будет затруднен, выполняем сразу после их установки. В следующем разделе описан пример, когда сначала возводился внутренний слой комнаты, и тем не менее качество экранирования было высоким. Таким образом, независимо от последовательности сборки, проводя перемагничивание всего экрана или отдельных его частей, в большинстве случаев удается уменьшить поле внутри комнаты до достаточно малой величины.

4. Три примера

4.1. Фирма Woodward-Clyde Consultants

В 1980 г. мы сконструировали свою первую комнату (рис. 8.10), экранированную двумя слоями электротехнической стали, в Окленде (шт. Калифорния) для фирмы Woodward-Clyde Consultants. Эта комната имеет рабочий объем 23 м^3. В то время мы еще не перемагничивали с помощью переносной катушки уже установленные листы экрана, хотя каждый из них был предварительно хорошо размагничен. После возведения наружного слоя поле в комнате составляло 8500 нТл. Чтобы уменьшить его, были испробованы различные способы перемагничивания: постукивание или вибрация. Из нескольких видов молотков и вибраторов наиболее эффективным оказался ручной молоток из резины. После простукивания всего наружного слоя экрана поле внутри комнаты уменьшилось до ~2950 нТл, что соответствует коэффициенту экранирования, равному 15. Установив внутренний слой, мы получили

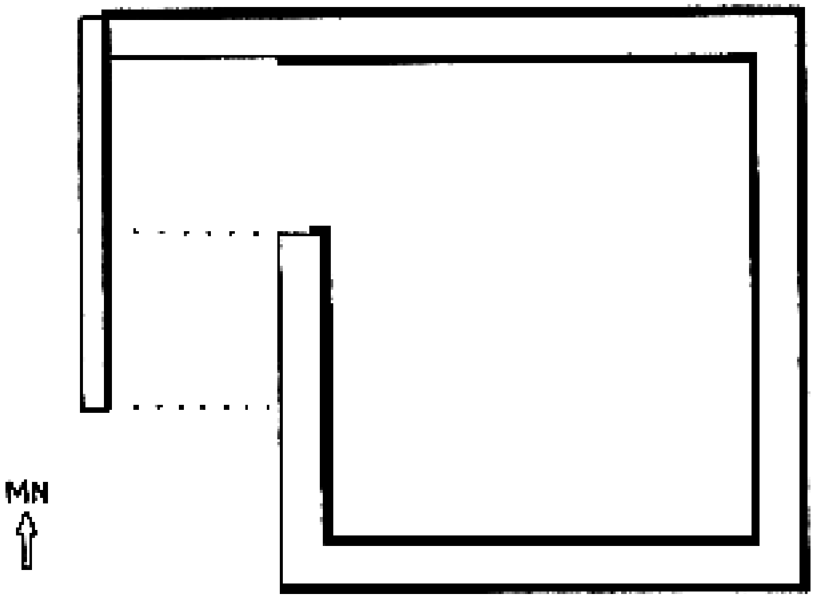


Рис. 8.10. План экранированной комнаты фирмы Woodward-Clyde Consultants. Комната имеет прихожую (частично экранированное пространство при входе), однако, как показывает наш опыт, это не является необходимым условием для получения высоких значений коэффициента экранирования.

поле уже 490 нТл, а после простукивания этого слоя оно уменьшилось до 325 нТл. Достигнув предела в использовании механической обработки, мы решили применить катушку, с помощью которой ранее размагничивались листы, и, обработав ею поверхность стен, сразу же снизили поле до 126 нТл. В результате обработки внутреннего слоя и двух наружных стен удалось уменьшить среднее поле внутри комнаты до 103 нТл, т.е. коэффициент экранирования достиг величины 420.

Во время измерений в комнате мы обнаружили кратковременные поля, создаваемые, как оказалось, транспортом, движущимся по шестирядному шоссе, осевая линия которого находилась в 15 м от комнаты. Легковые автомобили индуцировали импульсы магнитного поля около 150 нТл длительностью 4–6 с, а автобусы и грузовики – поле около 800 нТл. Поскольку экранирование таких медленно меняющихся магнитных полей с помощью экранов из электротехнических сталей со сравнительно большой коэрцитивностью малоэффективно, комнаты необходимо устанавливать в местах с достаточно низким уровнем магнитных помех.

4.2. Фирма Sierra Geophysics

Всю сложность проблем, связанных с остаточной намагниченностью электротехнической стали, хорошо демонстрирует пример создания в 1981 г. фирмой Sierra Geophysics экранированной лаборатории недалеко от Сиэтла (шт. Вашингтон). Объем комнаты составляет 28 м^3. Она находится в местности с большим магнитным наклонением (72°) и геомагнитным полем 54000 нТл. Последовательность монтажа комнаты была следующей. 1. Возведение наружного слоя пола и потолка и обработка их переносной катушкой. 2. Возведение всего внутреннего слоя и обработка его переносной катушкой. 3. Возведение стен наружного слоя. Такая последовательность сборки позволила осуществить перемагничивание стен внутреннего слоя в почти неэкранированном внешнем поле, близком по направлению к вертикали. По завершении первых двух стадий сборки внутреннее поле было на удивление малым – в пределах от 290 до 820 нТл. На следующий день были установлены и перемагничены переносной катушкой стены наружного слоя. Поле внутри комнаты теперь лежало в интервале от −12000 до −14900 нТл (среднее значение составляло −13400 нТл) и было антипараллельно внешнему полю, на что указывает знак минус. Через 5 суток, в течение которых экран не подвергался никакой обработке, были проведены повторные измерения: поле составляло от −11700 до −14100 нТл (среднее значение −12900 нТл). Повторное перемагничивание внешних стен переносной катушкой привело к некоторому изменению среднего поля; оно стало равно −13500 нТл. Эти эксперименты показали, что существенная часть остаточного поля в комнате, экранированной с помощью листов электротехнической стали, довольно долго релаксирует (времена релаксации превышают 4·10^5 с) и что

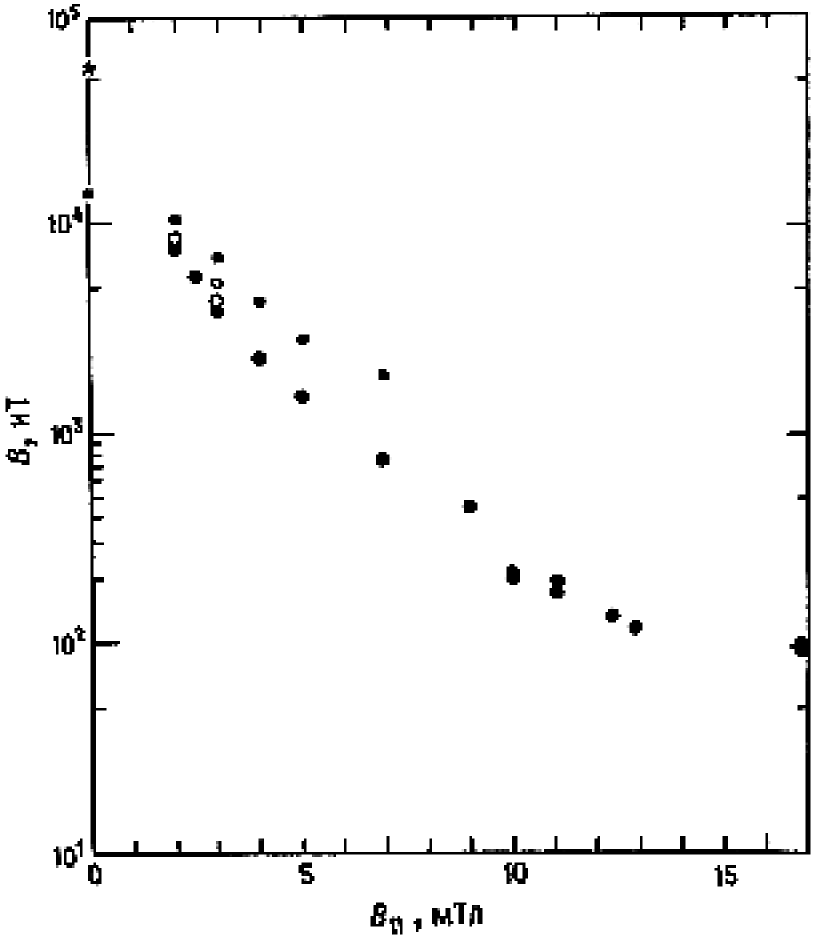


Рис. 8.11. Изменение магнитного поля B в объеме, ограниченном двухслойным экраном из трансформаторной стали, сконструированным для фирмы Sierra Geophysics (Редмонд, Вашингтон), в процессе магнитной обработки с помощью переносной катушки. Кружки – поле после обработки внутреннего слоя при возрастающей амплитуде переменного поля $B_п$ (она отложена по оси абсцисс). Квадратики – поле после обработки внешнего слоя при максимальной амплитуде поля, создаваемого переносной катушкой, сразу вслед за обработкой внутреннего слоя при амплитуде, соответствующей абсциссе данной точки. Светлые символы – повторная магнитная обработка. Поле было усреднено по 20 точкам, расположенным на высоте от 20 до 205 см над полем внутреннего слоя.

экранирующие свойства использованного материала сильно зависят от его «магнитной предыстории».

В ходе последующей магнитной обработки, описанной ниже, среднее поле было уменьшено до − 95 нТл (диапазон изменений от − 43 до − 147 нТл), что соответствовало коэффициенту экранирования, равному 570. При этом были выявлены стабильность остаточной намагниченности и характер взаимодействия слоев при их последовательном перемагничивании (рис. 8.11).

Идея обработки заключалась в размагничивании внутреннего слоя экрана до такой степени, чтобы поле внутри комнаты было примерно равно нулю. Это представлялось возможным, поскольку внутренний слой обладал довольно большой величиной ARM. После возведения

внешнего слоя стены внутреннего слоя оказались в поле, значительно меньшем геомагнитного. Обрабатывая внутренний слой переносной катушкой, можно было уменьшить его остаточную намагниченность и тем самым уменьшить поле внутри объема. Для этого постепенно увеличивали амплитуду поля размагничивающей катушки, так что перестраивались домены со все большей коэрцитивностью (рис. 8.11).

После каждой обработки внутреннего слоя внешний слой также сканировали той же катушкой, но при максимальной амплитуде переменного поля, равной 12,5 мТл. При последовательном использовании переменного поля с амплитудой 2 и 3 мТл поле в объеме, ограниченном экраном, стремилось к пределу, отвечающему равновесным значениям намагниченности обоих слоев. Это означает, что остаточная намагниченность применявшейся электротехнической стали может варьировать в широких пределах. В ходе дальнейшей магнитной обработки оказалось, что коэффициент экранирования также имеет предел, соответствующий предельной эффективной проницаемости материала, достижимой с помощью воздействий, перестраивающих доменную структуру. По мере уменьшения поля на самом внутреннем слое такие воздействия становятся все менее эффективными и степень экранирования достигает своего предела. Для двухслойных экранов этот предел, по-видимому, примерно равен 50 нТл (табл. 8.3) вне зависимости от материала слоя. Соответствующее предельное значение коэффициента экранирования равно, таким образом, $\sim 10^3$.

Таблица 8.3. Характеристики некоторых экранированных комнат[1)]

Владелец и место расположения	Внутренние размеры, м	Объем, $м^3$	Число слоев экрана	Материал экрана	Диапазон значений внутренних полей, нТл	Год создания
Виндзорский университет (Онтарио)	3,0 × 2,7 × 2,5	20	1	Сталь	600–1400	1973
Калифорнийский университет (Санта-Круз)	3,7 × 4,3 × 3,0	48	2	»	100–250	1983
Принстонский университет (Принстон, Нью-Джерси)	5,6 × 3,8 × 2,1	45	2	»	400–1200	1981
Стэнфордский университет (Стэнфорд, шт. Калифорния)	9,1 × 1,2 × 1,2 (цилиндр)	42	2	Мю-металл	50–100	1976
Калифорнийский университет (Сан-Диего)	4,9 × 4,0 × 2,1	41	2	Сталь	60–125	1983
Калифорнийский технологический институт (Пасадена)	4,2 × 3,3 × 2,8	39	2	»	120–220	1982
Woodward-Clyde (Плезант-Хилл, шт. Калифорния)	3,1 × 4,3 × 2,4	32	2	»	75–250	1983[2)]

Продолжение таблицы 8.3

Владелец и место расположения	Внутренние размеры, м	Объем, м³	Число слоев экрана	Материал экрана	Диапазон значений внутренних полей, нТл	Год создания
Sierra Geophysics (Редмонд, Вашингтон)	3,6 × 3,3 × 2,4	28	2	»	90–150	1981
Woodward-Clyde (Окленд, шт. Калифорния)	3,0 × 3,0 × 2,4	22	2	»	75–250	1980
Институт наук о Земле (Тайпей, Тайвань)	2,5 × 3,6 × 2,5	23	2	»	50–125	1983
Phyllips Petroleum (Бартлсвилл, Оклахома)	2,1 × 3,7 × 2,6	20	2	»	50–125	1983
Горная школа, шт. Южная Дакота (Рапид-Сити)	2,7 × 2,4 × 2,7	17	2	»	300–400	1981
Гавайский университет (Гонолулу)	2,4 × 2,4 × 2,4	14	2	Мю-металл	75–120	1977[3)]
Калифорнийский технологический институт (Пасадена)	1,8 × 1,8 × 1,8	6	2	»	50–200	1981[4)]
Техасский университет (Галвестон)	1,8 × 1,8 × 1,8	6	2	»	75	1973/ /75
Хьюстонский университет (Хьюстон, шт. Техас)	2,7 × 2,4 × 3,0	19	3	Сталь	100–250	1983
Виндзорский университет (Онтарио)	3,0 × 2,7 × 2,1	17	3	»	50–100	1982
Технический университет Хельсинки (Отаниеми, Финляндия)	2,4 × 2,4 × 2,4	14	3	Мю-металл	5	1980
Физико-технический институт (Западный Берлин)	2,2 × 2,2 × 2,2	11	6	»	10	1981

1) Данные, приведенные в таблице, представлены создателями или пользователями комнат, а также взяты из литературных источников.

2) Комната перенесена из Окленда, где была построена в 1980 г.

3) Комната перенесена из Техасского университета (Даллас), где была построена в 1965 г.

4) Комната перенесена из Лаборатории реактивного движения, где была построена в 1967 г.

4.3. Калифорнийский политехнический институт

Чистая в магнитном отношении лаборатория для биомагнитных исследований, имеющая объем 38 м^3, была создана в Калифорнийском технологическом институте (Пасадена) в 1982 г. Для того чтобы обеспечить наилучшие условия при исследовании магнитных свойств био-

магнитных материалов, здесь были соединены в одном сооружении магнитный экран из электротехнической стали и чистая в магнитном отношении лаборатория. Внутренняя поверхность экрана была покрыта эпоксидным красителем и гипсовыми несгораемыми панелями. Лаборатория была снабжена приспособлением для нагнетания воздуха, пропущенного через магнитный фильтр, а также душем при входе во внутреннюю оболочку экрана.

При конструировании лаборатории возникли две необычные проблемы. Первая заключалась в том, что размер экрана в направлении север–юг должен был быть равен 6,2 м, а это значительно превышает размеры известных экранов из стали и приближается к максимальному горизонтальному размеру экранов из мю-металла. Соответствующая длина внутренней камеры составляла 4,2 м, кроме того, у северной стенки предусматривалось оставить пространство шириной 1,7 м для организации экранированной прихожей (аналогично изображенной на рис. 8.10), в которой располагается душ и проходят воздуховоды и различные вспомогательные трубопроводы. Вторая проблема касалась водопроводных и канализационных труб, сделанных из стали и чугуна и необходимых для функцирования всего здания. Проведение этих труб между слоями экрана потребовало перепланировки их конфигурации. Пришлось убрать трубы, оканчивавшиеся вблизи экрана, у концов которых наблюдались большие поля рассеяния. Все трубы были расположены в направлении восток–запад, а в тех случаях, когда это было невозможно сделать, проведены в обход подальше от экрана. Там, где это было удобно, использовались трубы из немагнитных материалов, однако во многих случаях мы вынуждены были отказаться от такой замены по соображениям стоимости или по техническим соображениям. Трубы, расположенные по линии восток–запад, были размагничены по всей длине с помощью катушки, применявшейся для обработки экрана. Это размагничивание было достаточно эффективным, так что внутри комнаты магнитные поля от труб на расстоянии, большем чем 0,5 м, уже не регистрировались.

Объем, ограниченный внешним слоем экрана, был равен 80 м^3 и поле внутри него после первоначальной обработки переносной катушкой составляло 400 нТл. По завершении установки внутреннего слоя, но до магнитной обработки среднее поле в комнате составляло примерно 200 нТл (коэффициент экранирования 215). В результате обработки внутреннего экрана поле удалось уменьшить до 80 нТл, а стабильное его значение сохранялось на уровне 120–200 нТл (коэффициент экранирования около 300).

5. Краткое содержание

Наличие остаточной намагниченности у ферромагнитных материалов позволяет конструировать недорогие и достаточно эффективные магнитные экраны, защищающие от постоянных магнитных полей,

например от геомагнитного. В этой главе мы описали три таких двухслойных экрана из обычной трансформаторной стали. Материал подвергали воздействию переменного магнитного поля с помощью специальных переносных катушек с целью создания остаточной намагниченности, более всего подходящей для экранирования. Наши исследования показали, что экранирующими свойствами обладают практически все ферромагнитные материалы, но эффективность экранирования можно существенно повысить путем специальной обработки материала и правильного конструирования и расположения экрана.

Благодарности

Нам хотелось бы поблагодарить Вульфа Гозе, Д. Т. А. Саймонса и анонимного рецензента за замечания по ранней редакции рукописи. Идея использования новых экранирующих материалов родилась в 1974 г. на семинаре, руководимом Бобом Пэттеном (Техасский университет), на котором присутствовали Джон Фостер и один из авторов (Г. Р. С.), предложившие в 1979 г. сконструировать двухслойный экран для фирмы Woodward-Clyde Consultants. Майк Ступавски и Дэвид Саймонс великодушно поделились своим опытом работы с однослойным экраном. Д. Паркер и Дж. Джонстон помогали нам во время сотрудничества с фирмой Woodward-Clyde Consultants. Очень большую роль в создании описанных в этой главе экранированных лабораторий сыграли, в частности, Майкл Розенбаум, Джордж Кларк, Уильям Рихтер, Генри Саламей, Памела Кросс, Кэрол Ван Олстин и Джон Спорич. Contribution No. 578 from the University of Texas Institute for Geophysics.

Литература

Cohen D. (1967). A shielded facility for low-level magnetic measurements, J. Appl. **38**, 1295–1296.

Cohen D., Edelsack E. A., Zimmermann J. E. (1970). Magnetcardiograms taken inside a skhielded room with a superconducting magnetometer, Appl. Phys. Lett., **16** 278–282.

Cravath A. M. (1957). Magnetic shielding with multiple cylindrical chells, Rev. Sci Instrum., **28**, 659.

Erne S. N., Hahlmbohm H. D., Scheer H., Trontelj Z., 1981. The Berlin magnetically shielded room: Section B: Performances. In: Biomagnetism: Proceedings Third International Workshop on Biomagnetism (S. N. Erne, H. D. Hahlbohm, and H. Lubbig, eds.) de Gruyter, Berlin, pp. 78–88.

Jackson J. D., 1962. Classical Electrodynamics, Wiley, New York.

Kelha V. O., 1981. Construction and performance of the Otanii magnetically shielded room. In: Biomagnetism: Proceedings Third International Workshop on Biomagnetism (S. N. Erne, H. D. Hahlbohm, and H. Lubbig, eds.), de Gruyter, Berlin pp. 33–50.

Kittel C. (1966). Introduction to solid state. Physics, Wiley, New York. [Имеется перевод: Киттель Ч., 1978. Введение в физику твердого тела, Наука, М.]

Mager A., 1981. The Berlin magnetically shielded room: Section A: Design and construction. In: Biomagnetism: Proceeding Third International Workshop on Biomagnetism (S. N. Erne, H. D. Hahlbohm, and H. Lubbig, eds.), de Gruyter, Berlin, pp. 51–78

Patton B. J., 1967. Magnetic shielding. In: Methods in Paleamagnetism (K. M. Creer and S. K. Runcorn, eds), Elsevier, Amsterdam, pp. 569–588.

Patton B. J., Fitch J. L. (1962). Design of a room-size magnetic shield. J. Geophys. Res., **67**, 1117–1121.

Schwiezer F. (1962). Magnetic shielding factors of a system of concentric spherical shells, J. Appl. Phys., **33**, 1001–1003.

Scott G. R., Frohlich C. (1980). Constructing a magnetically shielded room with transformer steel, EOS, **61**, 942.

Symons D. T. A., Stupavsky M. (1983). A low cost magnetically shielded room for paleomagnetic research, EOS, **64**, 220.

Thomas A. K. (1968). Magnetic shielded enclosure design in the DC and VLF region, IEEE Trans. Electromagn. Compat., **EMC-10**, 142–152.

Wadley W. G. (1956). Magnetic shielding with multiple cylindrical shells, Rev. Sci. Instrum., **27**, 910–916.

Weast R. C. (ed.), 1973. Handbook of Chemistry and Physics, 54th ed., CRC Press, Cleveland.

Wikswo J. P., 1975. Noninvasive magnetic measurements of the electrical and mechanical activity of the heart, Ph.D.thesis, Stanford University.

Wills A. P. (1899). On the magnetic shielding effect of trilamellar spherical and cylindrical shells, Phys. Rev., **9**, 193–213.

Магниторецепция: теоретическое рассмотрение

III

Гипотеза магниторецепции, основанной на использовании магнетита,– только одна из многих, предложенных с начала нынешнего столетия, однако лишь в последние несколько лет она стала всерьез рассматриваться при объяснении механизма магниторецепции у животных. Это произошло благодаря выявлению магнетита биологического происхождения в тканях многих животных, увеличению числа животных, у которых обнаружена чувствительность к магнитному полю Земли, и осознанию того, что магнетит может служить реальной основой магнитотаксиса у бактерий. Пример с бактериями показывает, что живые организмы способны очень просто решать проблему детектирования направления магнитного поля. В самом деле, всю проявляемую организмами чувствительность к направлению поля можно объяснить наличием лишь нескольких образований, подобных магнитосоме, связанной с клетками волосков. Однако детальный механизм работы сенсорной системы на основе магнетита нам неизвестен, и это еще более усложняет объяснение наблюдаемой у животных чувствительности к малым геомагнитным флуктуациям и локальным магнитным аномалиям (величина которых может составлять всего 0,1% от фонового поля).

В первых трех главах этого раздела обсуждаются различные подходы к проблеме чувствительности к магнитному полю. Розенблюм, Юнгерман и Лонгфеллоу критически рассматривают гипотезу магниторецепции, основанной на магнитной индукции и сводящейся, следовательно, к электрорецепции. Они пытаются выяснить, можно ли с помощью какого-либо известного механизма электрорецепции обеспечить необходимую чувствительность. Йорк обсуждает с энергетической точки зрения те условия, которым должны удовлетворять сенсорные системы на основе магнетита для достижения высокого разрешения, а Киршвинк и Уокер анализируют возможность существования механизма магниторецепции, основанного на использовании большого числа магнетитных рецепторов, и, привлекая данные по естественному отбору, пытаются оценить размер частиц в таких структурах. Наконец, Гоулд рассматривает различные данные, полученные при изучении поведения животных, указывающие на то, что малые изменения геомагнитного поля могут играть роль в появлении «чувства карты» у животных.

Глава 9

ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ РАССМОТРЕНИИ ИНДУКЦИОННОЙ ГИПОТЕЗЫ МАГНИТОРЕЦЕПЦИИ

Брюс Розенблюм, Роджер Л. Юнгерман, Лоран Лонгфеллоу[1]

1. Введение

Изучение поведения животных с очевидностью показало, что некоторые из них воспринимают весьма слабые магнитные поля (такие, например, как магнитное поле Земли). Тем не менее лишь у немногих видов идентифицирован орган, ответственный за магниторецепцию. Известны только два бесспорных случая наличия таких систем – это кристаллы магнетита у бактерий и ампулы Лоренцини у пластиножаберных рыб. Магниторецепция является также, по-видимому, единственным чувством, характерным для животных, аналог которого не проявляется у человека.

Способность воспринимать магнитное поле и отсутствие четко выраженного органа магниторецепции ставит перед учеными проблему, единственную в своем роде. Магниторецепция характерна для столь большого числа видов, что она, по-видимому, представляет собой достаточно общее явление. Основанием для такого предположения и ключом к установлению природы соответствующего органа является и тот факт, что магнетитные кристаллиты часто присутствуют у живых организмов в таком количестве, что в принципе они могут быть ответственны за магниторецепцию, и при этом не выполняют никаких известных функций. Другой механизм магниторецепции, который реализуется у пластиножаберных рыб, основан на использовании индукции Фарадея и не требует наличия магнитных материалов; он может быть характерен и для наземных животных. В целом проблема магниторецепции представляется весьма важной, и при ее решении возможно несколько подходов.

В этой главе мы обсудим возможные формы органов магниторецепции, основанной на магнитной индукции, исходя из ограничений, налагаемых шумами. В тех случаях, когда известны размер и форма

[1] *Bruce Rosenblum, Roger L. Jungerman, Laurent Longfellow*, Department of Physics University of California, Santa Cruz, California 95064. Present adress of R.L.J.: Department of Applied Physics, Stanford University, Sanford, California, 94305.

соответствующего органа чувства, можно оценить налагаемые шумами ограничения на пороговую чувствительность. Опыт изучения различных видов рецепции у животных показывает, что природа часто действует при конструировании соответствующего органа весьма эффективно, и во многих случаях такой орган работает как раз на пороге чувствительности, полученном расчетным путем. Мы используем указанную процедуру в обращенном виде и попытаемся определить возможную форму органа исходя из наблюдаемой чувствительности и общебиологических и видовых ограничений.

Сначала мы остановимся на общих аспектах влияния шума на чувствительность, а затем рассмотрим случай теплового шума в рецепторе. Далее мы обсудим вопрос о существовании органа магниторецепции, использующего индукцию Фарадея.

2. Влияние шума; общие положения

Любой орган чувства реагирует на воздействие со стороны окружающей среды, например на величину магнитного поля в данном месте, и передает полученную информацию в виде электрического сигнала на более высокий нейронный уровень для переработки, ответа и хранения. Шумом мы называем некий сигнал, одновременно передаваемый по тем же каналам и неотличимый от истинного сигнала, порождаемого окружающей средой. На более высоких уровнях, например на уровне центральной нервной системы, полученная информация сравнивается с данными от других рецепторов или с ранее накопленной информацией, возможно, усредненной по большому периоду времени. Если система достаточно сложна и изощренна, то скорее всего простое и четкое понятие предела чувствительности отсутствует. Поэтому сначала мы рассмотрим систему, в которой нет сложных корреляций или долговременных усреднений. Это упрощение, хотя и не всегда правильное, позволяет получить хорошее приближение для оценки многих простых пороговых эффектов, таких как восприятие слабого звука или света. В этом случае минимальный детектируемый сигнал имеет величину порядка шума. Поскольку мы хотим оценить те ограничения, которые налагаются на орган чувства шумом, нам следует остановиться на шуме, возникающем внутри рецептора. Поэтому мы не будем принимать во внимание «внешний шум», который может «обмануть» рецептор.

Где же возникает в органе магниторецепции тот внутренний шум, который нас интересует? В некоторых органах чувств можно выделить первичный преобразователь, который превращает сигнал, поступающий из окружающей среды, в форму, подходящую для переработки в последующем отделе органа чувства, после чего он передается, скажем, в центральную нервную систему. Примером такого первичного преобразователя является ухо; глаз, напротив, представляет собой почти прямое продолжение центральной нервной системы. В основе такого различия

лежит энергия поступающих квантов. Энергия кванта света достаточно велика, чтобы непосредственно, с помощью электрохимического процесса, индуцировать нервный импульс. Энергия кванта звукового сигнала на пять порядков меньше, поэтому ухо должно иметь некую первичную структуру – макроскопический неквантовый (т. е. классический) преобразователь сигнала для передачи его нервным окончаниям.

Предлагались различные экзотические механизмы, с помощью которых магнитное поле могло бы индуцировать в нейронах нервные импульсы электрическим или электрохимическим путем. Однако энергия квантов, характерная для взаимодействия с геомагнитным полем, чрезвычайно мала и прямая стимуляция нейронных процессов кажется маловероятной. Должен существовать какой-то первичный преобразователь сигнала. Оба обнаруженных в природе магниторецептора (у бактерий и пластиножаберных рыб) действительно имеют такие макроскопические преобразователи. Лежащие в основе их действия механизмы – вращающий момент, приложенный к магнитному материалу, и индукция Фарадея – являются также простейшими и наиболее очевидными с точки зрения физики способами детектирования магнитных полей.

Попытаемся определить характеристики макроскопического первичного преобразователя для случая индукционного магниторецептора исходя из анализа шумов и чувствительности. Механизм последующей переработки информации, поступающей от макроскопического преобразователя, по всей вероятности, похож на другие нейронные процессы. Будем считать, что, как и в случае других органов чувств, этот механизм работает на таком уровне чувствительности, который близок к обусловленному шумом теоретическому пределу, и поэтому будем пренебрегать любым шумом, вносимым на более поздних стадиях, сконцентрировав все внимание на первичном преобразователе.

Как и любая биологическая система, первичный преобразователь может генерировать систематический и случайный шумы, оценить которые очень трудно. Однако всегда существует тепловой шум, налагающий ограничения, которые невозможно устранить, и минимальный сигнал, детектируемый биологическими, электронными и механическими системами, часто определяется именно им. Предположим, что это условие выполняется и в данном случае. Поскольку первичный магнитный преобразователь находится в тепловом контакте с окружающей средой, любая его характеристика, на которую влияет магнитное поле, будет варьировать под влиянием тепловых флуктуаций. Чтобы изменение этой характеристики можно было отнести на счет влияния магнитного поля, указанное изменение должно превышать любые качественно неотличимые от него случайные тепловые отклонения.

Прежде чем пытаться анализировать индукционный способ восприятия магнитного поля, рассмотрим механизм магниторецепции, основанный на использовании магнитных материалов. Он изучен более детально и обсуждается в следующей главе.

Магнитные материалы, с помощью которых может осуществляться магниторецепция, скорее всего представляют собой магнитные диполи в виде кристаллитов размером до микрона с высоким содержанием железа или других переходных элементов. Эти кристаллы должны быть каким-то образом связаны с нервными окончаниями. О морфологии, размере и составе индукционного рецептора известно меньше, чем о рецепторе, основанном на использовании магнитных материалов. Прежде чем пытаться установить все эти характеристики индукционного органа, мы сопоставим два указанных механизма.

Магнитное поле вызывает поворот магнитного кристаллита – первичного преобразователя, и возникающее при этом напряжение или давление каким-то образом индуцирует в нейроне электрический сигнал. В случае же индукционного механизма выходной сигнал первичного преобразователя уже является электрическим. Поворот магнитных кристаллитов в магнитном поле происходит всегда, для этого не требуется никаких действий со стороны животного; напротив, для получения сигнала при индукционном механизме необходимо, чтобы животное совершало определенные движения.

Чувствительность при детектировании, основанном на использовании магнитных диполей, определяется величиной случайных поворотов диполей из-за тепловых флуктуаций. При индукционном механизме она определяется разностью между напряжением, генерируемым тепловым шумом, и напряжением, обусловленным движением животного в магнитном поле. В обоих случаях чувствительность может увеличиваться при многократной регистрации животным магниторецепторного сигнала или усреднении по нескольким рецепторам.

То, что магнетитные кристаллиты в самом деле могут быть ответственны за магниторецепцию у животных, показано только для бактерий. Тем не менее известно, что такие материалы способны обеспечить наблюдаемую чувствительность к геомагнитному полю, а возможно, и более высокую чувствительность. В следующем разделе мы обсудим, может ли обладать необходимой чувствительностью индукционный магниторецептор, и попытаемся оценить характеристики соответствующего органа.

3. Орган, ответственный за индукционную магниторецепцию

Некоторые пластиножаберные рыбы обладают чувствительностью к малым магнитным полям, например к магнитному полю Земли (Kalmijn, 1982), причем, как предполагается, используют для этого магнитную индукцию. Эти рыбы (акулы и скаты) воспринимают электрические поля с помощью проводящих каналов (каналы ампул Лоренцини), которые соединяют поры на коже с чувствительными к напряжению клетками (электрорецепторами), расположенными глубоко в теле рыбы. Поскольку

некоторые рыбы реагируют на поля менее 1 мкВ/м (Kalmijn, 1982), им нужно перемещаться со скоростью лишь несколько сантиметров в секунду, чтобы возникла ЭДС, достаточная для детектирования магнитного поля Земли с помощью системы электрорецепции. [1]

Птицы или другие наземные животные в отличие от рыб не способны к индукционной магниторецепции. У рыб электрическая цепь состоит из канала ампулы, электрорецептора и внешней среды (морской воды). Поскольку сопротивление внешней цепи сравнительно невелико, существенная часть ЭДС приходится на электрорецептор и эффективно используется. Показано (Rommel, McCleave, 1973), что с увеличением сопротивления внешней цепи чувствительность уменьшается. У аналогичной детектирующей системы в воздушной среде по существу вся ЭДС приходилась бы на воздушный участок цепи, а ЭДС на электрорецепторе была бы ничтожно мала. Поэтому индукционная система в данном случае должна замыкаться в теле животного.

Если цепь замыкается в теле животного, то при перемещении последнего в однородном поле без какого-либо изменения магнитного потока в цепи не будет индуцироваться никакой ЭДС. Поток изменится только в том случае, когда цепь будет поворачиваться или деформироваться с изменением площади.

Простейшей индукционной системой является катушка из изолированного проводника, связанного с электрорецептором, которая может вращаться в магнитном поле. Это наилучшая с точки зрения электродинамики геометрическая конфигурация. Итак, рассмотрим в качестве индукционной системы круглую катушку, состоящую из одного или нескольких витков проводника из биологического материала.

Для регистрации очень малых напряжений, индуцируемых при вращении катушки, необходим чувствительный электрорецептор. По-видимому, наиболее чувствительным из известных биологических электрорецепторов обладают пластиножаберные рыбы. Однако наличие чувствительного электрорецептора – это лишь необходимое, но не достаточное условие. Нужно еще, чтобы мощность сигнала, подаваемого с катушки на электрорецептор, превосходила мощность теплового шума. Это условие определяет порог чувствительности детектора и тем самым налагает ограничения на устройство и форму катушки магниторецептора.

Заряд, проходящий через индукционную катушку, испытывает тепловые флуктуации в широком диапазоне частот. Эти флуктуации вызывают случайные колебания напряжения на катушке, так что на электрорецептор подается шумовой сигнал некоторой мощности. Поскольку в тепловом равновесии на каждую колебательную степень свободы приходится энергия kT (k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура), то эффективное среднеквадратичное шумовое напряжение на катушке (если

[1] Подробный нейрофизиологический анализ реакции ската на магнитное поле дан в книге Броуна Г.Р., Ильинского О.М. «Физиология электрорецепторов». – Л.: Наука, 1984 г. – *Прим. ред.*

не учитывать ее самоиндукцию) оказывается равным (см., например, Bennett, 1960)

$$V_{ш} = (4kTR\Delta f)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где R - сопротивление катушки, Δf – область частот, к которым «чувствителен» электрорецептор (эта последняя величина обсуждается ниже).

Предположим, что сигнал, который должен быть зарегистрирован на фоне указанного шумового напряжения, генерируется при повороте катушки. Последний может быть вызван поворотом животного на 90°, так что компонента геомагнитного поля, перпендикулярная плоскости катушки, изменяется от максимального значения до нуля. Индуцируемое при этом напряжение задается формулой

$$V_c = n\frac{dB}{dt}\pi r^2. \quad (2)$$

где n – число витков в катушке, $\frac{dB}{dt}$ – скорость изменения компоненты магнитного поля, перпендикулярной плоскости катушки, r – радиус катушки.

Предположим, что поворот на 90° совершается с плавным ускорением и замедлением за время τ; тогда сигнал V_c будет иметь форму плавно нарастающей, а затем плавно спадающей кривой с шириной, примерно равной τ, и амплитудой $V_c = nB\pi r^2\tau^{-1}$. Мы можем оценить τ лишь приближенно, и наши вычисления справедливы с точностью до множителя ~ 2.

Чтобы надежно реагировать на сигнал V_c, электрорецептор (и последующая цепь) должен быть восприимчив к частотам в диапазоне $\Delta f = (2\pi\tau)^{-1}$. Увеличение диапазона воспринимаемых частот позволило бы различать более тонкие детали формы сигнала V_c и коррелировать их с угловым ускорением. Однако это сопровождалось бы увеличением эффективного шумового напряжения. Высокочувствительные системы должны реагировать только на частотные компоненты, несущие наиболее важную информацию, поэтому мы предположим, что Δf в уравнении (1) равно $(2\pi\tau)^{-1}$. На каком уровне происходит ограничение диапазона частот – несущественно: это может происходить на уровне рецептора или даже на уровне «сознания».

Если среднеквадратичное значение шума равно напряжению сигнала, то с вероятностью 50% в любой момент времени τ будет существовать напряжение, неотличимое от реального сигнала, на который система уже не сможет надежно реагировать. Поэтому мы используем равенство $V_c = V_ш$ для оценки *минимального* воспринимаемого сигнала.

О надежности этого критерия говорят два соображения. Во-первых, животное в принципе может коррелировать повороты индукционной катушки с сигналом и исключать компоненты напряжения, находящиеся не в фазе с этими поворотами. Однако при оптимальной ширине полосы

воспринимаемых частот в соответствии с требованием детектирования только главной компоненты сигнала этот фазовый критерий может привести к уменьшению эффективного шума примерно лишь в два раза.

Существенно повысить эффективность системы можно и путем усреднения результатов нескольких наблюдений. При этом эффективный шум должен уменьшиться в $\sqrt{N}$ раз, где N – число наблюдений. Такое повышение чувствительности возможно, конечно, для любой сенсорной системы, однако у большинства животных чувствительность органов чувств не превышает ту, которая обеспечивается единичным наблюдением. К тому же в данном случае увеличение числа наблюдений означало бы, что животное должно совершить большое количество поворотов, что, конечно, нежелательно. Впрочем, при необходимости рассматриваемое обстоятельство легко учесть, внеся поправку в окончательный результат наших вычислений.

Для детектирования магнитного поля с точностью $\Delta B/B \simeq q$ необходимо, чтобы выполнялось условие $V_c/V_ш \simeq q$. Исходя из этого условия, оценим чувствительность системы для случая единичного наблюдения и рассмотрим, какие ограничения налагаются на орган, ответственный за восприятие магнитного поля с помощью индукции.

Прежде чем переходить к наземным животным, обратимся к пластиножаберным рыбам, а именно скатам, о которых имеется довольно много данных. Минимальное электрическое поле, которое влияло на поведение скатов, равно 10^{-5} В/м (Murray, 1965). Для канала ампулы Лоренцини длиной 1 см это соответствует $V_c = 10^{-7}$ В. Чтобы восприятие электрического поля имело поведенческие последствия, скат должен отреагировать на это поле с запаздыванием не более 0,1 с, что дает для Δf значение 2 Гц. Сопротивление канала у ската равно $3 \cdot 10^4$ Ом (Waltman, 1966), так что из уравнения (1) получаем для шумового напряжения значение $3 \cdot 10^{-8}$ В. Таким образом, амплитуда сигнала, при котором начинает наблюдаться поведенческая реакция у ската, в три раза больше уровня теплового шума. Это не только согласуется с нашей концепцией, но и подтверждает предположение, что тепловой шум фактически определяет порог детектирования [1].

Перейдем теперь к наземным животным. Выразим сопротивление через более важные и/или удобные параметры:

$$R = \rho\left(2\pi rn / \frac{1}{4}\pi d^2\right). \quad (3)$$

Здесь ρ – удельное сопротивление материала катушки, d – диаметр проводника, r - радиус витка катушки, n – число витков. Теперь мы можем

[1] У ската имеется около 50 ампул. При заданном направлении поля в результате соответствующего усреднения теоретическое отношение сигнала к шуму для такой амплитуды сигнала, при которой начинает наблюдаться поведенческая реакция, может увеличиться почти в 10 раз.

написать отношение сигнал/шум в виде

$$V_c/V_{ш} = q = n^{\frac{1}{2}} r^{\frac{3}{2}} d[\pi B/\tau(32kT\Delta f\rho)]^{\frac{1}{2}}. \qquad (4)$$

Величины перед квадратными скобками пока остаются неизвестными, а величины в скобках легко оценить.

Для определенности рассмотрим птицу средних размеров и предположим, что магнитный детектор находится у нее в голове. Предположим далее, что проходящий через катушку поток геомагнитного поля с индукцией $5 \cdot 10^{-5}$ Тл меняется от нуля до максимального значения при повороте головы птицы на 90° за 0,1 с. Чтобы детектирующая система надежно могла зарегистрировать такой импульс, должно выполняться условие $\Delta f = 2$ Гц. Наименьшим удельным сопротивлением среди всех известных органических биологических материалов обладают каналы ампул Лоренцини у пластиножаберных рыб: 25 Ом·см (Waltman, 1966). Это более чем на порядок меньше удельного сопротивления других биологических жидкостей у животных. Будем считать, что величина 50 Ом·см является разумной оценкой ρ хорошего проводника биологической природы. (Использование магнетита в качестве проводника мы рассмотрим ниже.) Для $T = 300$ К имеем $kT = 4{,}2 \cdot 10^{-21}$ Дж/К. Подставив эти значения в соотношение (4), получим

$$q = n^{\frac{1}{2}} r^{\frac{3}{2}} d(4 \cdot 10^{6}). \qquad (5)$$

(Здесь, как и во всех остальных уравнениях, мы используем систему единиц МКС.)

Уравнение (5) содержит три независимые переменные, что, казалось бы, допускает значительный произвол в выборе параметров магнитного детектора. Однако ряд физических ограничений и некоторые правдоподобные предположения позволяют существенно сузить область допустимых значений этих параметров.

На рис. 9.1 в логарифмическом масштабе представлена широкая область значений параметров r и d. Жирная горизонтальная прямая наверху отвечает верхнему пределу $r = 5$ мм, следующему из предположения, что детектор должен помещаться в черепе птицы размером 1 см. Жирная прямая, идущая под углом 45°, указывает границу, соответствующую условию $r > d$.

Объем, фактически занимаемый проводящим материалом, образующим петлю, примерно равен

$$V = n(2\pi r)\pi d^{2}. \qquad (6)$$

С помощью (5) мы можем исключить из этого соотношения n и получить выражение для минимального объема, который должен занимать проводящий материал при заданном q:

$$V_{min} = \frac{3 \cdot 10^{-13}}{r^{2}} q^{2}. \qquad (7)$$

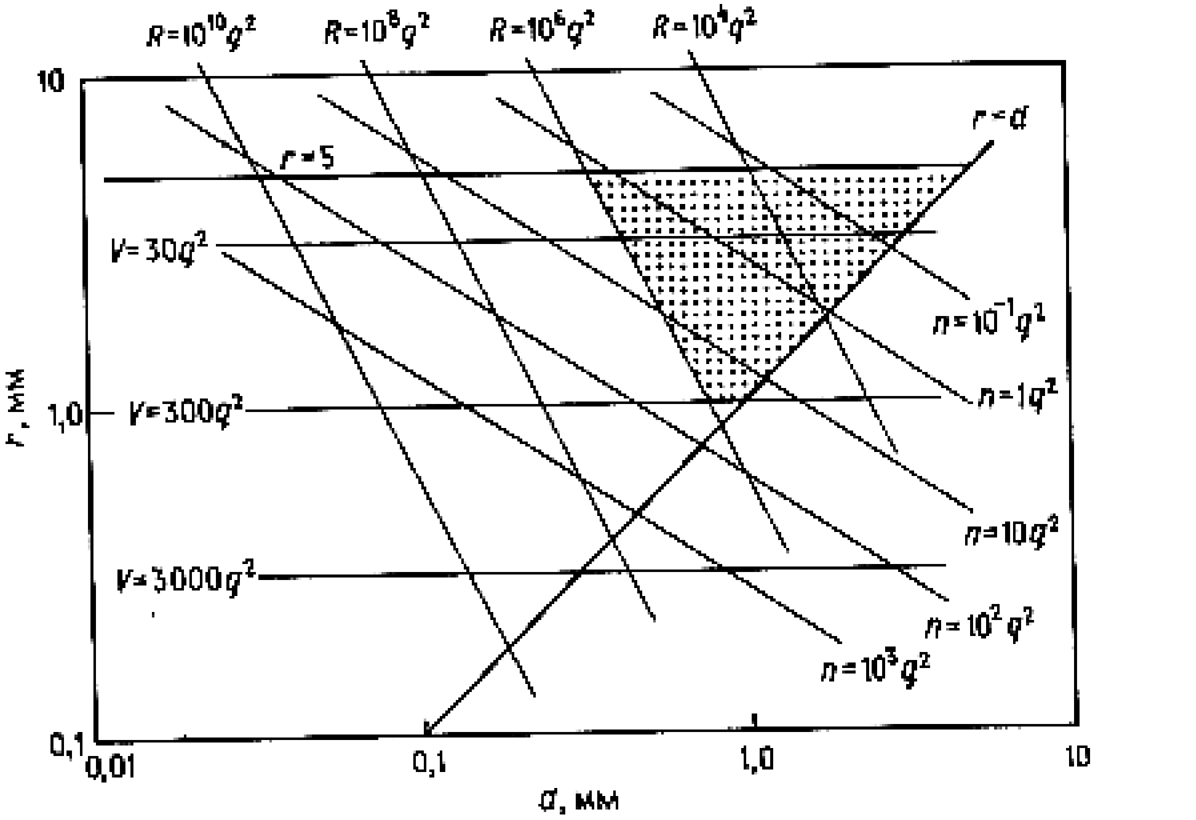


Рис. 9.1. На координатной плоскости радиус катушки r – диаметр проводника d нанесены линии, отвечающие постоянным значениям минимального объема v_{min} (мм³), сопротивления R (Ом) и числа витков n, причем отношение сигнала к шуму q служит параметром. Приемлемые для индукционного детектора значения r и d находятся внутри затененной области.

Может показаться странным, что объем пропорционален $1/r^2$, но это обусловлено зависимостью n от r при заданном q. На рис. 9.1 мы провели также тонкие линии, соответствующие указанным объемам.

Объем черепа птицы равен примерно 1000 мм³. Следовательно, даже при отношении сигнал/шум, равном единице, значительная часть объема мозга при малых r будет занята катушкой. Магниторецепция, по-видимому, не является для птиц жизненно важной функцией, так что соответствующий орган не может быть больше по размерам, чем органы зрения или слуха. Поэтому области с $r \leqslant 1$ мм (объем более 300 мм³) можно не рассматривать.

Пока мы ограничили r и d областью значений, заключенной между прямыми $r = 5$ мм, $r = d$ и $r = 1$ мм. Эта область осталась открытой слева, со стороны малых d. Покажем, что системы с очень малым d маловероятны, поскольку катушка должна иметь большое число витков и обладать высоким сопротивлением.

Используя выражение (5), мы провели на рис. 9.1 семейство прямых, соответствующих заданным n. Исключив n из выражения (3), мы также провели семейство прямых, отвечающих постоянным R при заданном q. Как мы видим, и необходимое число витков, и сопротивление катушки быстро увеличиваются при уменьшении d. Предположим теперь, что

$q = 1$; это, по-видимому, минимальное значение отношения сигнал/шум при котором магниторецепция еще имеет поведенческие последствия.

С уменьшением d система очень быстро утрачивает простоту и компактность, характерную для $n = 1$. При очень малых d орган становится крайне некомпактным ($r \gg d$) и сложным ($n \sim d^{-2}$). Кроме того, при увеличении числа витков возрастает объем, занимаемый изолирующим материалом, чего мы не учитывали при оценке полного объема. Исходя из всего этого, будем считать, что d не может быть меньше чем, скажем, 0,1 мм. Более количественные оценки мы получим рассмотрев вопрос о сопротивлении катушки.

Как показывают линии постоянного сопротивления на рис. 9.1, R очень быстро возрастает с уменьшением d ($R \sim d^{-4}$). Разумной верхней оценкой сопротивления при условии, что изоляцией служит биологический материал, представляется величина порядка 10^8 Ом. Однако на самом деле есть основания считать эту оценку завышенной.

И мощность сигнала, и мощность теплового шума, передаваемого катушкой на электрорецептор, зависят от внутреннего сопротивления электрорецептора одинаковым образом, так что внутреннее сопротивление электрорецептора не влияет на отношение сигнал/шум. Однако всегда имеется некоторый порог детектирования, обусловленный наличием внутреннего источника шума в электрорецепторе, и мощность сигнала должна быть больше этого шума. Если бы сопротивление катушки намного превышало входное сопротивление электрорецептора, то мощность передаваемого сигнала уменьшалась бы как R^{-2}. Поэтому область допустимых значений d должна быть ограничена на рис. 9.1 слева линией, соответствующей сопротивлению катушки, лишь ненамного превышающему входное сопротивление электрорецептора.

Какие ограничения налагаются на входное сопротивление высокочувствительного электрорецептора - не очень ясно. Возможно, важную роль играют большая площадь поверхности синапсов и необходимость изоляции от окружающей среды. Наиболее чувствительным известным нам электрорецептором обладают некоторые пластиножаберные рыбы; можно предположить, что аналогичные устройства используют и другие организмы. К сожалению, точные данные о входном сопротивлении электрорецептора у пластиножаберных рыб нам неизвестны. Имеется, однако, одна работа (Murray, 1965), из которой мы можем сделать выводы (Jungerman, Rosenblum, 1980), что сопротивление составляет $\sim 10^5$ Ом. Нам представляется, что в качестве нижней границы для d можно взять линию с $R = 10^6$ Ом.

Таким образом, приемлемые значения r и d для органа магниторецепции, основанной на индукции, лежат в трапецеидальной области, представленной на рис. 9.1. Отсюда следует, что катушка магниторецептора имеет радиус $r = 3$ мм, а диаметр проводника составляет $d = 1$ мм, причем эти оценки получены с точностью до множителя около 3. Катушка должна иметь только один или, самое большее, несколько

витков. Проводник обладает низким сопротивлением, покрыт изолирующей мембраной и связан с нервной системой.

Если бы такая макроскопическая система существовала, она вряд ли осталась бы незамеченной. Мы не можем исключить существования хотя бы некоторых участков такой цепи, но, по-видимому, они недостаточно иннервированы. Казалось бы, что из всего сказанного выше можно сделать вывод о малой вероятности использования наземными животными индукционного органа магниторецепции. Однако, прежде чем окончательно отвергать возможность существования такого детектора, отметим, что имеется орган, по всей видимости, удовлетворяющий нашим требованиям. Речь идет о полукружных каналах в лабиринте внутреннего уха, которые ограничены мембранами, наполнены проводящей эндолимфой и имеют подходящие размеры. Электрорецепторами могут служить богатые нервными окончаниями кристы. Эти кристы и связанная с ними студенистая масса, фиксирующая волоски, замыкают проводящий путь полукружного канала, создавая давление на стенки ампулы (Kornhuber, 1974). Вся эта система должна быть достаточно хорошо изолирована, так как сопротивление студенистой массы, по-видимому, значительно больше сопротивления эндолимфы. Только в том случае, когда голова животного поворачивается вокруг оси, *перпендикулярной* плоскости полукружного канала, волоски и студенистая масса смещаются под действием перетекающей эндолимфы. Для индуцирования ЭДС необходим поворот вокруг оси, лежащей в *плоскости* канала, и такой поворот не вызывает перетекания эндолимфы. Идея о том, что орган ориентации в поле тяжести служит одновременно и органом ориентации в магнитном поле, представляется весьма привлекательной, тем более если учесть, что угол между направлениями магнитного и гравитационного полей может использоваться для навигации (Wiltschko, Wiltschko, 1972).

Остановимся на возможности использования магнетита в качестве проводника. При обсуждении параметра индукционной катушки мы выбрали для удельного сопротивления проводящего материала значение 50 Ом·см; это довольно большая величина для обычного материала биологического происхождения. Поскольку магнетит обнаружен у самых разных животных, мы пересчитали наши результаты для случая проводника с удельным сопротивлением магнетита, т. е. $5 \cdot 10^{-3}$ Ом·см, и пришли к выводу, что если бы катушка была сделана из материала с проводимостью магнетита, то ее размеры были бы на порядок меньше, чем указано выше. Однако существование магнетитовой петли с размерами в несколько десятых долей миллиметра представляется нам менее вероятным, чем существование системы, описанной выше, особенно если учесть условие (7) для объема: необходимый объем магнетита оказывается на порядок больше, чем обнаружено у животных.

Поскольку магнетит распределен в организме в виде кристаллитов размером менее микрона, возникает вопрос, не может ли каждое из этих N зерен работать как крохотный индукционный детектор? У отдельного

зерна отношение сигнала к шуму $q \ll 1$, но в среднем для набора из N детекторов q будет в $\sqrt{N}$ раз больше, т. е. больше единицы. Однако это предположение противоречит данным о количестве магнетита даже в большей степени, чем гипотеза магнетитной катушки. Далее, для усреднения сигнала от большого числа любых рецепторов с $q \ll 1$ необходимо, чтобы в нейронной цепи, связанной с рецепторами, были очень малы пороговая чувствительность и шум. Это обстоятельство ограничивает число рецепторов, по которым проводится усреднение.

Эксперименты по установлению природы магниторецепции очень сложны. Некоторые их аспекты обсуждаются в работе Jungerman, Rosenblum, 1980.

4. Заключение

Магниторецептор, основанный на индукции Фарадея и не использующий магнетита, может существовать у таких наземных животных, как птицы. Чтобы обладать чувствительностью, необходимой при детектировании магнитного поля Земли, подобный орган должен иметь размеры порядка миллиметра. Подходящими кандидатами на роль таких органов представляются полукружные каналы внутреннего уха. В случае еще более мелких животных, для которых описанные органы слишком велики, индукционная магниторецепция исключена.

Для объяснения «чувства карты», проявляемого голубями при поиске дома, было высказано предположение, что голуби могут воспринимать изменения магнитного поля, составляющие $10^{-3} \div 10^{-4}$ от поля Земли (гл. 12). Такая чувствительность в принципе возможна для магнетитных магниторецепторных систем, однако в случае индукционных систем она представляется нереальной.

5. Дополнение: несколько слов о навигации

Данные о навигации животных, в особенности голубей, указывают на то, что эти животные должны «чувствовать» отклонение от направления на цель своего «путешествия». Ориентации только по магнитному полю Земли для этого недостаточно. Предположение об использовании голубями «чувства карты», основанного на локальных изменениях геомагнитного поля, всесторонне обсуждаются Гоулдом в гл. 12. Как мы уже отмечали, индукционная магниторецепция не может обеспечить необходимой для этого чувствительности. Не исключено, однако, что индукция играет роль в другом механизме, основанном частично на инерционной навигации (двукратное интегрирование ускорения). Хотя не все опубликованные экспериментальные данные полностью согласуются с концепцией инерционной навигации, ее нельзя отвергнуть.

Наибольшие ошибки накапливаются при определении угловых параметров, поэтому ясно, что сочетание способности определять

направление с возможностью интегрировать ускорение значительно снижает требования к инерционной навигационной системе. Чрезвычайно высокая точность в определении ускорения необходима в любом случае, но теоретически она оказывается уже вполне достижимой. Отметим, что способность к точному определению ускорения необходима также и для того, чтобы различать компоненты магнитного поля при помощи «чувства карты», основанного на локальных пространственных изменениях магнитного поля Земли. Как указывает Гоулд, для «чувства карты» необходимо очень точное, до 10^{-4}, определение поля тяжести. Это означает, что с такой же точностью должно определяться и ускорение.

Литература

Bennett W. R., 1960. Electrical Noise, McGraw-Hill, New York.

Jungerman R. L., Rosenblum B. (1980). Magnetic induction for the sensing of magnetic fields - An analysis, J. Theor. Biol., **87**, 25.

Kalmijn A. J. (1982). Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes, Science, **218**, 916.

Lowenstein O. E., 1974. Comparative morphology and physiology, Chapter II. In: Handbook of Sensory Physiology, Vol. VI/I (Kornhuber H. H., ed.), Springer-Verlag, Berlin, p. 77.

Murray R. W. (1965). Electroreceptor mechanisms: Relations of impulse frequency to stimulus strength and responses to pulsed stimuli in ampullae of Lorenzini of elasmobranchs, J. Physiol. (London), **1980**, 592.

Rommel S. A., Jr., McCleave J. D. (1973). Sensitivity of American eels (Anguilla rostrata) and Atlantic salmon (Salmo-salar) to weak electric and magnetic fields, J. Fish. Res. Board Can., **30**, 657.

Waltman B. (1966). Electrical properties and fine structure of ampullary canals of Lorenzini, Acta Physiol. Scand., **66** (Suppl.), 264.

Wiltschko W., Wiltschko R. (1972). Magnetic compass of European robins, Science, **176**, 62.

Глава 10

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАГНИТОРЕЦЕПТОРОВ

Эллен Д. Йорк[1]

1. Введение

Основой предположения о том, что магнитные материалы биологического происхождения ответственны за чувствительность мигрирующих животных к геомагнитному полю, послужили два типа данных: данные о наличии магнетита в организме многих животных и данные о существовании «магнитного чувства», полученные в экспериментах при изучении поведения животных. В работе, опубликованной в 1945 г., Изинг (Ising, 1945) сообщал о безуспешных попытках обнаружить материал с остаточной намагниченностью в голове ласточки, а Гриффин (Griffin, 1944) в обзоре, посвященном навигации птиц, отметил отсутствие каких-либо известных магнитных материалов биологического происхождения. В то же время в 1962 г. Ловенстам (Lowenstam, 1962) предположил, что магнетит может быть ответствен за поведение хитонов, а в 1972 г. Китон (Keeton, 1972) высказал гипотезу, что «магнитное чувство» у птиц связано с «механическими смещениями в некотором устройстве», хотя и не предложил никакого конкретного строения такого устройства. В 1975 г. (Blakemore, 1975) были обнаружены содержащие магнетит бактерии, проявляющие магнитотаксис, а несколько раньше получены убедительные доказательства, что птицы (Keeton, 1971; Wiltschko, Wiltschko, 1972; Walcott, Green, 1974) и пчелы (Lindauer, Martin, 1968, 1972) чувствительны к геомагнитному полю. Это послужило стимулом к серьезной количественной проверке предположения о том, что магнитные материалы являются рецепторами, ответственными за «магнитное чувство» (Gould et al., 1978; Walcott et al., 1979; Yorke, 1979; Kirschvink, Gould, 1981; Kirschvink, 1982).

В этой главе мы детально рассмотрим некоторые аргументы в пользу данного предположения. Как теперь установлено, магнетит широко распространен в живых организмах, но предположение о его ответственности за «магнитное чувство» животных экспериментально не доказано.

[1] *Ellen D. Yorke*, Department of Physics, University of Maryland. Baltimore Country, Catonsville, Maryland 21288.

2. Энергетический подход

Тело с постоянной намагниченностью, помещенное в магнитное поле, стремится ориентироваться вдоль поля наподобие стрелки компаса или магнитного теодолита. Если объект имеет размеры, близкие к размерам органеллы, т.е. ~ 1 мкм или меньше, то на степень его ориентации вдоль магнитного поля 0,5 Гс будет сильно влиять тепловое (броуновское) движение. Тонкий стержень, помещенный в среду с температурой T, будет совершать хаотические вращательные движения со средней энергией $\frac{1}{2}kT$ для каждой из двух степеней свободы (k – постоянная Больцмана, равная $1{,}38\cdot10^{-16}$ эрг/К); при комнатной температуре эта энергия равна $4{,}14\cdot10^{-14}$ эрг. В магнитном поле B стержень с магнитным моментом μ, направленным под углом θ к полю, имеет потенциальную энергию $\mu B\cos\theta$. Если $\mu B > kT$, стержень будет ориентирован преимущественно вдоль поля. Именно таким условиям удовлетворяет однодоменная магнетитная гранула с намагниченностью насыщения 480 Гс, длиной 0,1 мкм и аксиальным отношением 0,42, находящаяся в поле 0,5 Гс. Принятые размеры гранулы соответствуют типичным размерам одного домена магнетита и согласуются с размерами магнетитных кристаллов, обнаруженных у голубей (Walcott et al., 1979), бактерий (Blakemore, 1975) и пчел (Gould et al., 1978). Степень ориентации стержня можно повысить, увеличив магнитный момент гранулы путем увеличения ее объема при условии сохранения однодоменной структуры или расположения отдельных доменов так, чтобы их магнитные моменты суммировались и ориентировались как единое целое. Именно такой стратегии придерживаются бактерии, проявляющие магнитотаксис. Другая стратегия, возможно, используемая высшими животными, состоит в усреднении отклика на магнитное поле многих независимых рецепторов. Мы обсудим ее позже как предполагаемый способ регистрации очень малых изменений магнитного поля.

Конкуренция между упорядочением не взаимодействующих друг с другом магнитных диполей в магнитном поле и их разупорядочением под действием теплового движения строго описывается теорией парамагнетизма Ланжевена, которая подробно изложена во многих учебниках физики (см., например, Reif, 1965; Reitz et al., 1979). Степень ориентации моментов измеряется средним значением проекции магнитного момента на направление магнитного поля и пропорциональна намагниченности ансамбля диполей. Она задается функцией Ланжевена

$$\langle\cos\theta\rangle = L(\mu B/kT) = \mathrm{cth}(\mu B/kT) - kT/\mu B, \qquad (1)$$

график которой изображен на рис. 10.1. Как указывается в работах Frankel, Blakemore, 1980; Kirschvink, 1981, при $\mu B/kT > 6$ степень ориентации не может быть существенно повышена путем увеличения магнитного момента μ, а требование экономного расходования материалов налагает ограничение на количество содержащегося в организме магне-

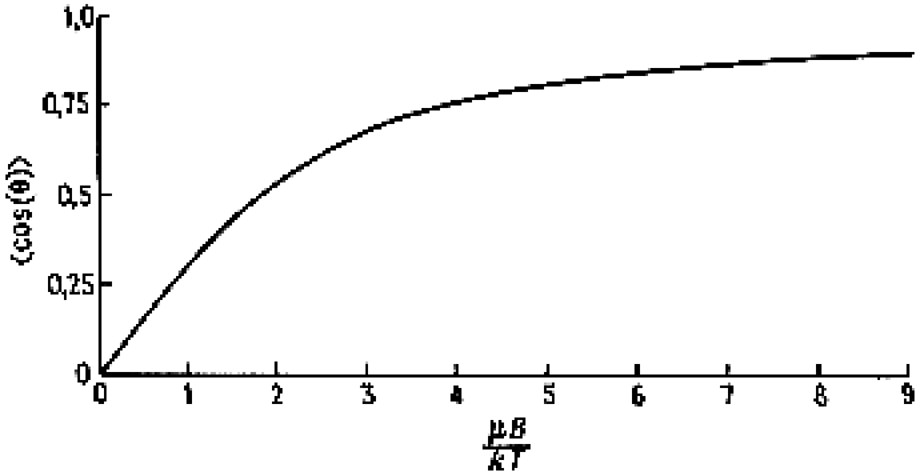


Рис. 10.1. Функция Ланжевена, описывающая зависимость средней проекции магнитного момента на направление магнитного поля от интенсивности теплового движения.

тита. Из рис. 10.1 ясно также, что степень ориентации мала при $\mu B/kT \leqslant 1$.

Поскольку теория Ланжевена предполагает, что диполи не взаимодействуют друг с другом, интересно оценить среднее поле в месте расположения данного диполя, создаваемое соседними диполями, и сравнить его с полем Земли. В работе Eldridge, 1961 показано, что среднее поле в ненамагниченном ансамбле точечных диполей, случайно расположенных с плотностью D, равно $2{,}9D\mu$.

Плотность D в случае пчел можно оценить, воспользовавшись данными работы Kuterbach et al., 1982. Эти авторы обнаружили гранулы *не*магнитных соединений железа в организме пчел. На долю этих гранул приходится $f_1 \approx 0{,}07$ объема исследованных клеток, так что если V_0 – объем отдельной гранулы, то общее число гранул равно $f_1 V/V_0$. По оценкам авторов, если бы только 0,33% из них состояли из Fe_3O_4, то можно было бы объяснить остаточную намагниченность, о которой сообщалось в работе Gould et al., 1978. Таким образом, плотность D магнетитных гранул объемом V_0 должна быть равна $3{,}3\cdot 10^{-3} f_1/V_0$. Поскольку в случае магнетита $\mu = 480\, V_0$, для среднего поля получаем значение 0,32 Гс, что сравнимо с полем Земли. Таким образом, хотя модели, основанные на представлении о невзаимодействующих гранулах магнетита, привлекательны своей простотой, к полученным с их помощью оценкам следует относиться критически. Правда, можно использовать их как некие ориентиры, пока не будут получены новые экспериментальные данные.

3. Время отклика

В простейшей модели магниторецептора гранула магнетита, ориентированная вдоль поля Земли, способна легко поворачиваться; единственным препятствием этому служит вязкость среды, в которой она находится. При перемещении животного магнетитная гранула поворачивается вслед за полем, и ее ориентация относительно некой находящейся рядом физиологической структуры изменяется. Это индуцирует соответствующий сигнал, который обрабатывается в нервной системе животного. В работе Gould, Kirschvink, 1980 предложена модель «короткого замыкания мембраны», в которой магнетитная гранула заключена в изолирующую мембрану. Поскольку магнетит является хорошим проводником, среда вокруг него может поляризоваться или деполяризоваться в зависимости от ориентации гранулы относительно поверхности мембраны и от того, контактирует ли она с жидкой средой вне мембраны. Другая модель основана на том же принципе, что и система чувствительных к полю тяжести отолитов, имеющаяся у многих животных. Вращение гранул магнетита смещает реснички, причем характер и степень таких смещений зависят от ориентации гранулы и, таким образом, указывают направление вектора магнитного поля.

Для модели со свободным вращением гранулы существенно, чтобы магнетит достаточно быстро переориентировался в соответствии с движением животного, иначе оно не сможет использовать получаемую информацию. Если момент сил трения среды, в которой находится гранула магнетита, пропорционален угловой скорости гранулы, то уравнение, описывающее ее движение, совпадает с уравнением движения маятника при наличии сопротивления (Yorke, 1979). Пусть I – момент инерции гранулы относительно оси, проходящей через центр перпендикулярно большей полуоси, θ – угол между магнитным моментом (параллельным большей полуоси гранулы) и полем B, а $-F d\theta/dt$ – момент сил трения, препятствующих вращательному движению гранулы. Постоянная F зависит от размеров и формы гранулы, а также от вязкости окружающей ее среды. Уравнение движения гранулы (скорость изменения углового момента равна полному моменту сил) имеет вид

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\mu B \sin\theta - F\frac{d\theta}{dt}. \qquad (2)$$

Момент инерции гранулы зависит от ее плотности (5,1 г/см³ для магнетита) и размеров. Приведем выражения для величин I, μB и F в случае гранулы с длиной L и аксиальным отношением a, находящейся в среде с вязкостью η, и вычислим их значения при $L = 0{,}1$ мкм, $a = 0{,}5$, $B = 0{,}5$ Гс и вязкости в 100 раз большей, чем у воды:

$$I = \rho a^2 L^5/12 \cong 1{,}1\cdot 10^{-26}\ \text{г}\cdot\text{см}^2,$$

$$\mu B = M_s B a^2 L^3 = 6\cdot 10^{-14}\ \text{эрг},$$

$$F = (2\pi/3)\,\eta L^3/[2\ln(2/a) - 1] = 1{,}2\cdot 10^{-15}\ \text{г}\cdot\text{см}^2/\text{с}.$$

При малых смещениях ($\theta < 20°$) $\sin\theta \approx \theta$ и уравнение (2) сводится к уравнению движения гармонического осциллятора при наличии сопротивления. При тех значениях параметров, которые характерны для

однодоменной магнетитной гранулы, это сопротивление велико и осциллятор после отклонения экспоненциально приближается к положению, в котором он ориентирован вдоль поля. Время установления равновесия равно примерно $\frac{F}{\mu B} \approx 20$ мс. Магнетит будет отслеживать изменение направления поля примерно с таким же характерным временем даже при больших угловых смещениях. Если гранула магнетита не может свободно вращаться, то время, необходимое для эффективного определения направления поля, все же может быть достаточно мало, но в этом случае оно зависит от неизвестных вязкоупругих свойств структуры, с которой связана гранула, и поэтому его трудно оценить.

Модели магниторецепции, предполагающие свободное вращение гранул, легко объясняют две наблюдаемые особенности «магнитного чувства». Во-первых, это чувство у всех видов является «аксиальным» (Wiltschko, Wiltschko, 1972; Emlen, 1975); исключение, возможно, составляет лосось (Quinn et al., 1981). Это означает, что мигрирующие птицы, пчелы, тунцы (Walker et al., 1982), по-видимому, не различают магнитные поля, направленные в противоположные стороны (**B** и −**B**). Например, оба поля, представленные на рис. 10.2, воспринимаются одинаково: как поле с горизонтальной составляющей, направленной на север. Поскольку ориентации вытянутой гранулы в этих двух случаях различаются только положениями ее северного и южного полюсов, а

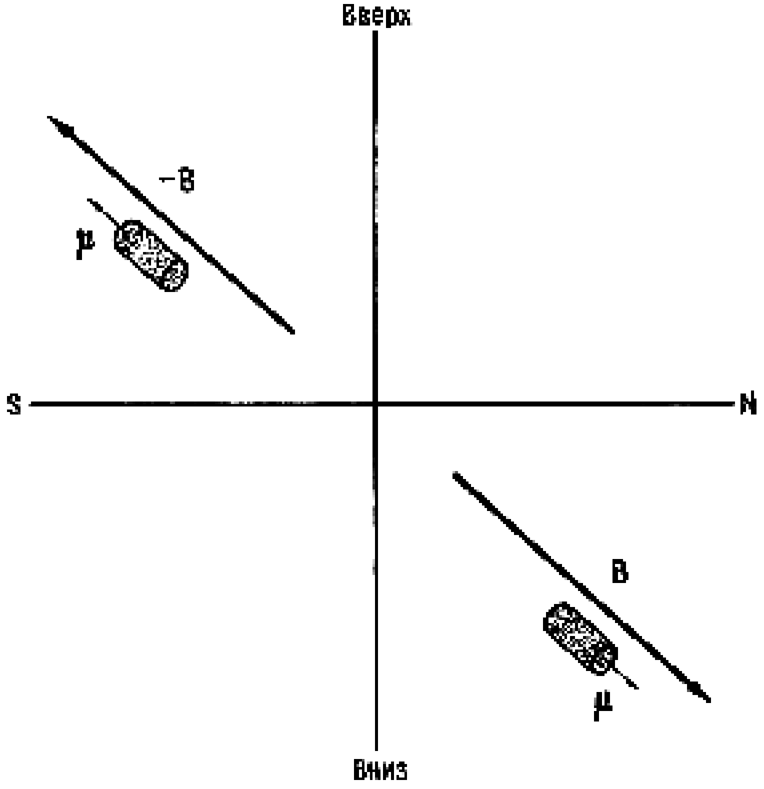


Рис. 10.2. Как показывает изучение поведения животных, они не различают поля с ориентацией **B** и −**B**. Обратите внимание, что продолговатая магнетитная гранула в обоих случаях ориентируется вдоль одной и той же прямой.

большая полуось располагается одинаково, то воздействие на соответствующую структуру (например, на мембрану в модели «короткого замыкания») будет одинаково.

Во-вторых, из таких моделей следует, что поведение животного не должно меняться при попытках «размагнитить» его в сильном пульсирующем или переменном поле. Обращение направления намагниченности гранулы не может изменить ориентации ее большой полуоси дольше, чем на секунду, после чего она опять возвратится к ориентации вдоль поля. С этим согласуются наблюдения за поведением пчел (Gould et al., 1980).

Однако есть и другие наблюдения, которые не так легко объяснить с помощью модели свободного вращения. Эта модель предсказывает, что в слабых полях, когда степень ориентации магнетитных гранул мала, реакция на поле менее эффективна. Однако в сильных полях, как это видно из рис. 10.1, степень ориентации практически постоянна; так, значения $\langle \cos\theta \rangle$ для $\frac{\mu B}{kT} = 6$ и $\frac{\mu B}{kT} = 60$ различаются очень мало (0,83 и 0,98 соответственно), по крайней мере в рамках теории Ланжевена. В любом случае, согласно модели, животное должно лучше чувствовать более сильные поля. Тем не менее обнаружено, что в полях, немного превышающих геомагнитное, животные перестают ориентироваться. Например, пчелы теряют «магнитное чувство» в поле, превышающем 5 Гс (Lindauer, Martin, 1972). В таком поле они перестают ориентировать свой танец в направлении стрелки компаса, определяющем направление локального магнитного поля. Интересный эффект «окна» обнаружен у европейской малиновки, помещенной в магнитное поле изменяющейся величины (Wiltschko, 1978). Эта птица ориентируется в магнитном поле, напряженность которого не выходит за пределы узкой области, границы которой отличаются от локальной напряженности поля Земли на ± 0,2 Гс. Вне этой области способность ориентироваться вначале отсутствует, однако через несколько дней птицы начинают реагировать и на такие поля. У голубей никакого эффекта окна не обнаружено, хотя были проведены эксперименты (например, Walcott, Green, 1974), в которых они подвергались воздействию поля (от катушки, находящейся на голове птицы), более чем в два раза превышающего геомагнитное. Киршвинк (Kirschvink, 1981) показал, что степень ориентации горизонтального танца пчел в полях менее 4,5 Гс может быть описана функцией Ланжевена. Это согласуется с гипотезой свободного вращения, которая, однако, совершенно не соответствует поведению пчел в сильных полях.

Есть несколько способов согласования модели свободного вращения с неспособностью ориентироваться в сильных полях. Например, у пчел обнаружены гидраты оксида железа (Kuterbach et al., 1982), что позволяет предположить наличие у них суперпарамагнитных гранул магнетита. Возможно, ориентация этих гранул в достаточно сильных полях

индуцирует сигнал, который вводит пчелу в заблуждение, и она не реагирует ни на какую информацию о магнитном поле. Не исключено также, что поведение пчел в сильных полях, как и эффект «окна» у европейских малиновок, связано со способом переработки получаемой информации, а не с физическим устройством датчика «магнитного чувства». Есть данные, полученные при изучении поведения животных (см. в следующем разделе), что некоторые животные используют информацию не только о направлении поля, но и о его напряженности. Возможно, в слишком сильных или слишком слабых полях (но не настолько слабых, чтобы полностью исчезла возможность ориентироваться) европейские малиновки временно пренебрегают любой информацией о магнитном поле и возвращаются к ней, только когда убедятся, что большое поле, в котором они находятся, это постоянный, а не временный фактор. Работы по изучению реакции животных на изменение напряженности поля весьма немногочисленны. Можно отметить, например, очень интересную работу Walker et al., 1982, в которой обнаружено, что у желтоперого тунца можно выработать условный рефлекс на изменение поля; показано также, что в организме этих животных содержится магнетит и они нечувствительны к малым электрическим полям (так что скорее всего не используют индукцию).

4. Чувствительность к изменениям поля

После того как было обнаружено, что в организме у пчел и голубей содержится магнетит, и были проведены измерения низкотемпературной индуцированной остаточной намагниченности, стало ясно, что эти небольшие животные содержат очень много ($\sim 10^6-10^8$) однодоменных кристаллов магнетита. Это гораздо больше, чем требуется для детектирования магнитного поля Земли. С чем это связано?

Изучение поведения животных показывает, что мигрирующие птицы и пчелы чувствительны не только к полю порядка 0,5 Гс, но и к его изменениям, составляющим всего лишь 0,01% от среднего поля. Например, у голубей нарушается способность к ориентации при наличии естественных магнитных аномалий, напряженность поля в которых составляет 0,01–10% от средней величины (Walcott, 1978, 1980). На ориентацию голубей влияют также магнитные бури (Moore, 1977; Schreiber, Rossi, 1978). Некоторые мигрирующие птицы изменяют направление своего полета под влиянием искусственных изменений локального поля (Larkin, Sutherland, 1977). Мартин и Линдауер (Martin, Lindauer, 1977) обнаружили, что танец у пчел изменяется во время магнитных бурь. Было высказано предположение (Kirschwink, Gould, 1981; Yorke, 1981), что для определения малых изменений напряженности поля и/или его направления, имеющих место во время магнитных бурь, пчелам необходимо дополнительное количество магнитного материала. Улавливая такие изменения, животные получают дополнительную полезную ин-

формацию об окружающей среде. Они могут использовать магнитное поле не только для ориентации.

Известно, что у голубей чувствительность к малым изменениям поля проявляется при других условиях, чем чувствительность к направлению среднего поля. Взрослые голуби, к головам которых прикреплены индукционная катушка или постоянный магнит, изменяют направление своего полета по пути домой только в облачную погоду (Keeton, 1971); в солнечный день они предпочитают ориентироваться по солнцу. Однако при очень малых изменениях поля они сбиваются с пути при любых погодных условиях. Возникло предположение, что голуби используют магнитное поле двумя способами (и, возможно, имеют два разных набора рецепторов). Если небо затянуто облаками, магнитное поле используется как компас (а у молодых птиц, возможно, как некий калибровочный стандарт). В любую погоду малые изменения поля используются птицей как карта для определения местоположения. Данные «за» и «против» гипотезы использования магнитного поля голубями для ориентации суммированы в работе (Gould, 1972).

Для рецепции малых локальных изменений поля животное может суммировать сигналы от многих детекторов. Предположив, что детекторы представляют собой свободно вращающиеся магнетитные гранулы, Киршвинк и я оценили число гранул, необходимое для достижения наблюдаемой чувствительности. Для этого мы использовали результаты измерений остаточной намагниченности. По нашим оценкам, эти числа достаточно велики. Рассмотрим вкратце ход наших рассуждений.

Предположим, что сигнал от отдельного детектора подчиняется некоторому распределению вероятностей; средняя амплитуда сигнала равна $\bar{r}$, а дисперсия $\overline{\delta r^2}$. Характер распределения вероятностей зависит от магнитного поля и устройства детектора. Например, в случае свободно вращающейся гранулы вероятность $P(\theta, \varphi)\, d\theta d\varphi$ того, что гранула ориентирована в малом телесном угле $d\theta d\varphi$ (где θ отсчитывается от направления поля), задается распределением Больцмана

$$P(\theta, \varphi)\, d\theta d\varphi = \frac{\exp(\mu B \cos\theta/kT) \sin\theta\, d\theta d\varphi}{\left(\dfrac{2\pi kT}{\mu B}\right)\left[\exp\left(\dfrac{\mu B}{kT}\right) - \exp\left(-\dfrac{\mu B}{kT}\right)\right]}.$$

Именно это распределение мы использовали при вычислении функции Ланжевена, входящей в уравнение (1). Если имеется N детекторов, то суммарный сигнал при больших N описывается нормальным распределением со средним значением $N\bar{r}$ и дисперсией $N\overline{\delta r^2}$. Изменение магнитного поля приводит к изменению средней амплитуды сигнала от $\bar{r}$ до $\bar{r} + \overline{\Delta r}$. Такое изменение можно отличить от статистической флуктуации, если $N\overline{\Delta r}$ превышает среднеквадратичное отклонение, т. е. если $\Delta\bar{r} > (\overline{\Delta r^2}/N)^{1/2}$. Если отклик зависит от ориентации магнетитной гранулы относительно направления поля и в рецепции участвует некая

структура (например, мембрана в модели «короткого замыкания мембраны»), то δr^2 пропорционально $\Delta\theta^2$, что в свою очередь при $\mu B/kT > 1$ равно примерно $2kT/\mu B$. Отсюда следует, что изменение ориентации поля может быть зарегистрировано, если компонента ΔB, перпендикулярная исходному направлению поля, удовлетворяет условию

$$\Delta\theta \approx \frac{\Delta B}{B} \approx (2kT/\mu BN)^{1/2},$$

откуда при $\Delta B/B = 10^{-3}$ и $\mu B/kT \approx 1$ получаем $N > (2kT/\mu B)(B/\Delta B)^2 \approx \approx 10^6$. Такая же оценка была получена в предположении, что рецепторы чувствительны к изменениям только величины поля (Kirschvink, 1981). Кроме того, Киршвинк и Гоулд (Kirschvink, Gould, 1981) показали, что при повторных независимых измерениях, разделенных интервалами времени t, много бо́льшими, чем τ – время переориентации гранул (см. выше), эффективное число измерений возрастает от N до Nt/τ.

Для оценки условий, необходимых для рецепции малых изменений поля, мы использовали модель свободно вращающихся магнетитных гранул, но аналогичное рассмотрение (с несколько другими параметрами и функцией распределения вероятностей) применимо и для других моделей. Какой бы тип детектора ни использовался в случае «чувства карты» у птиц, а также для восприятия малых изменений поля у пчел, животное должно иметь много таких детекторов.

5. Другие типы детекторов

Гипотеза магниторецепции, основанной на использовании постоянных магнитов, привлекательна своей простотой. В ее пользу говорит широкая распространенность магнетита в царстве животных; с ее помощью можно объяснить некоторые особенности поведения животных, способных к магниторецепции. Однако эта гипотеза не единственна. В гл. 9 мы уже обсудили возможность использования магнитной индукции для определения направления магнитного поля пластиножаберными рыбами (см. также Jungerman, Rosenblum, 1980). Лиск (Leask, 1977) предложил механизм, основанный на оптической «накачке» молекул, расположенных в глазах птиц. Для реализации этого механизма уровень освещения должен быть близок к тому, который необходим для фоторецепции; он не может функционировать в темноте. Однако гипотезе Лиска противоречат результаты эксперимента по определению магнитной чувствительности мальков лосося в темноте (Quinn et al., 1981). В работе Schulten, Schulten, 1977 кратко обсуждается механизм магниторецепции, основанный на зависимости от магнитного поля скорости химических реакций. Эта гипотеза детально не разработана, и неизвестно, эффективен ли при разумных предположениях о молекулярных параметрах этот механизм в таких слабых полях, как 0,5 Гс. Наконец,

Киршвинк и Гоулд (Kirschvink, Gould, 1981) разработали несколько моделей, основанных на предположении об использовании для магниторецепции агрегатов взаимодействующих друг с другом суперпарамагнитных магнетитных гранул. Их модели так же хорошо согласуются с наблюдаемым поведением животных, как и модели с постоянными магнитами. Одна из них даже в состоянии дать физическое объяснение нечувствительности пчел к сильным магнитным полям.

6. Проверки гипотез

Гипотеза о существовании у насекомых или позвоночных магниторецепторов, работа которых основана на использовании магнетита, пока не получила четкого экспериментального подтверждения. Как это видно из обзора Гриффина (Griffin, 1982), число противников идеи о том, что животные способны воспринимать геомагнитное поле, все еще довольно велико. Быть может, окончательный ответ на этот вопрос дадут эксперименты по изучению поведения желтоперого тунца. Но даже и в этом случае останется нерешенным вопрос о природе магниторецептора.

Наиболее прямой способ проверки адекватности гипотезы о том, что магнетит ответствен за «магнитное чувство» животных, состоит в локализации скоплений магнетита у того или иного животного, их последующем хирургическом удалении или перерезке ведущих к ним нервов и наблюдении за поведением этого животного в магнитном поле. Все это – непростая задача (Walcott, Walcott, 1982; гл. 7); получить такие прямые и убедительные доказательства, по-видимому, удастся лишь в далеком будущем.

Второй подход (Kirschvink, Gould, 1981) заключается в разрушении магниторецепторов с помощью магнитного поля с большим градиентом. При этом будут разрушены только рецепторы, в которых используются суперпарамагнитные материалы или постоянные магниты; рецепторы же, основанные на других принципах (химические или индукционные), останутся целыми. В однородном магнитном поле на магнитный диполь действует лишь момент сил (но не сама сила), в неоднородном же поле появляется также и сила. Эта сила направлена в сторону увеличения напряженности поля и пропорциональна его градиенту [точнее, $F = \nabla(|\mu||B|\cos\theta)$]. На сферу радиуса r, перемещающуюся со скоростью v в среде с вязкостью η, действует сила трения, равная $6\pi\eta rv$. Под действием этой силы и сил, связанных с наличием градиента магнитного поля, сфера будет двигаться со скоростью, при которой обе силы равны по величине и противоположны по направлению. В предположении, что дипольный момент параллелен B, получаем для скорости магнетитной сферы

$$v = \frac{\mu(\nabla B)}{6\pi\eta r} = \frac{2}{9}\frac{(480)r^2(\nabla B)}{\eta}(\text{см/с}).$$

При $r = 0{,}1$ мкм, $\eta = 1$ пуаз (величина, в 100 раз превышающая вязкость воды) и $\nabla B = 10^4$ Гс/см (что вполне реально) находим $v \approx 10^{-4}$ см/с; это довольно большая величина в масштабах клетки. Таким образом, в неоднородном магнитном поле будет происходить смещение слабо связанных магнетитных гранул из того положения, при котором они могут выполнять роль рецепторов, т. е., по-видимому, можно лишить животное «магнитного чувства», поместив его в поле с большим градиентом. Необходимо подчеркнуть, однако, что отсутствие изменений в поведении животного не обязательно указывает на немагнитную природу рецепторов. Если магнетит связан со структурой, которая не разрушается механически при силе порядка $\mu\nabla B$, то он сохранит свою рецепторную функцию.

Киршвинк (Kirschvink, 1981), используя данные о поведении пчел, получил косвенные свидетельства в пользу магниторецепции, основанной на использовании постоянных магнитов со свободным вращением. Он показал, что точность выстраивания горизонтального танца пчел по направлениям стран света описывается функцией Ланжевена [уравнение (1)]. В эту функцию входят два подгоночных параметра, но один из них, μ/kT, можно оценить, вычислив магнитный момент отдельного магнита. Оказалось, что значение момента магнетитного кристалла объемом 10^{-15} см^3, равным объему однодоменной гранулы, приводит к результатам, хорошо согласующимся с наблюдаемой ориентацией танца. Такая внутренняя согласованность параметров не может служить прямым доказательством существования магнитов со свободным вращением, однако она является веским доводом в пользу данной гипотезы.

Еще одним косвенным тестом может служить характер танца пчел в переменном магнитном поле. На утрату магнитного чувства у животного, помещенного в быстро меняющееся магнитное поле, указывают многие модели, однако оценить характерное время поворота магнита и предсказать тем самым характерное время ($\sim F/\mu B$) изменения поля можно только с помощью модели со свободным вращением. Это время оказывается обратно пропорциональным напряженности поля. Ранее в этой главе мы показали, что при разумных значениях параметров и напряженности поля 0,5 Гс время поворота равно примерно 20 мс. Таким образом, можно ожидать, что точность ориентации танца ухудшится в переменном поле с амплитудой 0,5 Гс и частотой 50 Гц (или меньшей в случае большей вязкости; частота, при которой ухудшается точность ориентации, позволяет экспериментально измерить время отклика магниторецептора). Такое ухудшение может быть «скомпенсировано» увеличением амплитуды поля, поскольку время отклика обратно пропорционально напряженности, хотя в случае постоянного поля и функция Ланжевена, и эксперимент Киршвинка предсказывают лишь очень малое улучшение ориентации с увеличением поля.

Если обсуждаемый эффект удастся обнаружить, это еще не будет означать, что в организме пчел действительно имеются постоянные

магниты со свободным вращением, однако послужит еще одним веским доводом в пользу этой модели.

Литература

Blakemore R. P. (1975). Magnetotactic bacteria, Science, **190**, 377.

Eldridge D. E. (1961). Quantitative determination of the interaction fields in aggregates of single domain particles, J. Appl. Phys., **32**, 2475.

Emlen S. T., 1975. Migration: Orientation and navigation. In: Avian Biology, Vol. V (D. S. Farner and J. R. King, eds.), Academic Press, New York, p. 129.

Frankel R. B., Blakemore R. P. (1980). Navigational compass in magnetic bacteria, J. Magn. Magn. Mater., **15–18**, 1562.

Gould J. L. (1982). The map sense of pigeons, Nature, **296**, 205.

Gould J. L., Kirschvink J. L., Deffeyes K. S. (1978). Bees have magnetic remanence, Science, **102**, 1–26.

Gould J. L., Kirschvink J. L., Deffeyes K. S., Brines M. L. (1980). Orientation of demagnetized bees, J. Exp. Biol., **86**, 1.

Griffin D. R. (1944). The sensory basis of bird navigation, Q. Rev. Biol., **19**, 15.

Griffin D. R. (1982). Ecology of migration: Is magnetic orientation a reality? Q. Rev. Biol., **57**, 293.

Ising G. (1945). Physikalische Möglichkeit eines tierischen Orientierungssinnes auf Basis Erdrotation, Ark. Mat. Astron. Fys., **32A**, 1.

Jungerman R. L., Rosenblum B. (1980). Magnetic induction for the sensing of magnetic fields by animals – An analysis, J. Theor. Biol., **87**, 25.

Kalmijn A. J. (1982). Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes, Science, **218**, 916.

Keeton W. T. (1971). Magnets interfere with pigeon homing, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **68**, 102.

Keeton W. T., 1972. Effects of magnets on pigeon homing. In: Animal Orientation and Navigation (S. R. Galler, K. Schmidt-Koenig, G. J. Jacob, and R. E. Belleville, eds.), NASA SP-262, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., pp. 579–594.

Kirschvink J. L. (1981). The horizontal magnetic dance of the honeybee is compatible with a single-domain ferromagnetic magnetoreceptor, BioSystems, **14**, 193.

Kirschvink J. L. (1982). Birds, bees and magnetism: A new look at the old problem of magnetoreception, Trends Neurosci., **5**, 160.

Kirschvink J. L., Gould J. L. (1981). Biogenic magnetite as a basis for magnetic field detection in animals, BioSystems, **13**, 181.

Kuterbach D. A., Walcott B., Reeder R. J., Frankel R. B. (1982). Iron-containing cells in honeybee (*Apis mellifera*), Science, **218**, 695.

Larkin R. P., Sutherland P. J. (1977). Migrating birds respond to Project Seafarer's electromagnetic field, Science, **195**, 777.

Lindauer M., Martin H. (1968). Die Schwereorientirung der Bienen unter dem Einfluss der Erdmagnetfelds, Z. Vgl. Physiol., **60**, 219.

Lindauer M., Martin H., 1972. Magnetic effects on dancing bees. In: Animal Orientierung and Navigation (S. R. Galler, K. Schmidt-Koenig, G. J. Jacob, and R. E. Belleville, eds.), NASA SP-262, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., pp. 559–567.

Leask M. J. M. (1977). A physicochemical mechanism for magnetic field detection by migratory birds and homing pigeons, Nature, **267**, 144.

Lowenstam H. A. (1962). Magnetite in denticle capping in recent chitons (Polyplacophora), Geol. Soc. Am. Bull., **73**, 435.

Martin H., Lindauer M. (1977). Der Einfluss der Erdsmagnetfelds auf die Schwereorientierung der Honigbiene, J. Comp. Physiol., **122**, 145.

Moore F. R. (1977). Geomagnetic disturbance and the orientation of nocturnally migrating birds, Science, **196**, 682.

Quinn T. P., Merrill R. T., Brannon E. L. (1981). Magnetic field detection in sockeye salmon, J. Exp. Zool., **217**, 137.

Reif F., 1965. Fundamentals of Statistical and Thermal Physics, McGraw-Hill, New York.
Reitz J. R., Milford F. J., Christy R. W. 1979. Foundations of Electromagnetic Theory, 3rd ed., Addison-Wesley, Reading, Mass.
Schreiber B., Rossi O. (1978). Correlation between magnetic storms due to solar spots and pigeon homing performances, IEEE Trans. Magn., **Mag-14**, 261.
Schulten Z., Schulten K. (1977). The generation, diffusion, spin motion and recombination of radical pairs in solution in the nanosecond time domain, J. Chem. Phys., **66**, 4616.
Walcott B., Walcott C., 1982. A search for magnetic field receptors in animals. In: Avian Navigation (F. Papi and H. G. Wallraff, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 338–343.
Walcott C., 1978. Anomalies in the earth's magnetic field increase the scatter of pigeon's vanishing bearings. In: Animal Migration, Navigation, and Homing (K. Schmidt-Koenig and W. T. Keeton, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 143–151.
Walcott C. (1980). Magnetic orientation in homing pigeons, IEEE Trans. Magn., **Mag-16**, 1008.
Walcott C., Green R. P. (1974). Orientation of homing pigeons is altered by a change in the direction of an applied magnetic field, Science, **184**, 180.
Walcott C., Gould J. L., Kirschvink J. L. (1979). Pigeons have magnets, Science, **205**, 1027.
Walker M. W., Dizon A. E., Kirschvink J. L., 1982. Geomagnetic field detection by yellowfin tuna, Oceans Institute Conference Record, IEEE, New York, pp. 755–758.
Wiltschko W., 1978. Further analysis of the magnetic compass of migratory birds. In: Animal Migration, Navigation, and Homing (K. Schmidt-Koenig and W. T. Keeton, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 302–310.
Wiltschko W., Wiltschko R. (1972). Magnetic compass of European robins, Science, **176**, 62.
Yorke E. D. (1979). A possible magnetic transducer in birds, J. Theor. Biol., **77**, 101.
Yorke E. D., (1981). Srnsitivity of pigeons to small magnetic field variations, J. Theor. Biol., **89**, 533.

Глава 11

РАЗМЕР ЧАСТИЦ В МАГНЕТИТНЫХ МАГНИТОРЕЦЕПТОРАХ

Джозеф Л. Киршвинк, Майкл М. Уокер[1]

1. Введение

Как не раз отмечалось в этой книге, магнитное поле влияет на поведение очень многих животных. В широком смысле поведенческие реакции на магнитное поле можно разделить на две категории: к первой относится определение направления (север–юг) с помощью сравнительно малочувствительного «компаса», ко второй – «чувство карты» позвоночных, за которое ответственны более чувствительные системы.

1.1. Органеллы «компаса»

Примеры существования «компаса» весьма многочисленны. Это пассивная ориентация магнитотаксических бактерий и водорослей (Blakemore, 1975; Lins de Barros et al., 1981), ориентация танца пчел на горизонтальных сотах (Martin, Lindauer, 1977), перемещение в определенном направлении мальков лосося и серебрянок (Quinn, 1980, 1982; Quinn et al., 1981), а также пластиножаберных рыб (Kalmijn, 1982), ориентация угрей (Tesch, 1975, 1980), предпочтение определенной ориентации амфибиями (саламандрами и тритонами; Phillips, 1977; Phillips, Adler, 1978), способность к ориентации в облачную погоду голубей и мигрирующих птиц (Keeton, 1972; Wiltschko, 1972; Walcott, Green, 1974). Магнитотаксис бактерий связан с наличием у них однодоменных кристаллов магнетита (Frankel, Blakemore, 1980). Бактериальные клетки обладают достаточно большим постоянным магнитным моментом, чтобы они могли поворачиваться и ориентироваться вдоль сравнительно слабого (50 мкТл) геомагнитного поля, несмотря на разупорядочивающее действие броуновского движения. Чтобы такая пассивная компасная система работала, магнитная энергия ($\mu B \cos\theta$, где μ – магнитный момент клетки,

[1] *Joseph L. Kirschvink*, Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125. *Michael M. Walker*, Department of Zoology, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii 96822; and Southwest Fishers Center Honolulu Laboratory, National Marine Fishers Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, Honolulu, Hawaii 96812.

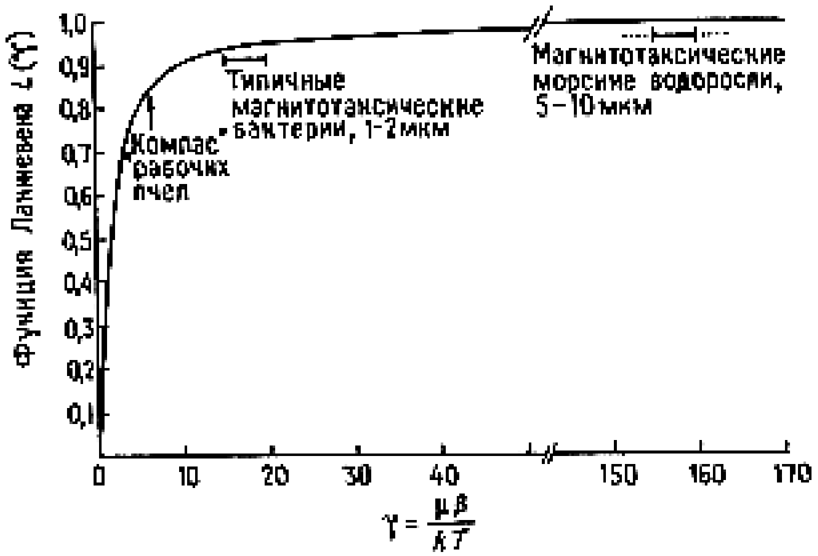


Рис. 11.1. Зависимость точности ориентации пчел, бактерий и водорослей от соотношения между магнитной и тепловой энергиями (функция Ланжевена). Несмотря на большие различия значений магнитных моментов, средняя точность ориентации этих организмов меняется очень слабо.

B – индукция поля, θ – угол между векторами μ и B) должна быть значительно больше тепловой энергии (kT, где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура). Разброс отклонений направления магнитного момента относительно направления поля задается распределением Больцмана $\exp\left(-\frac{\mu B}{kT}\right)$, а средняя степень ориентации вдоль поля описывается функцией Ланжевена $L(\mu B/kT) = \mathrm{cth}(\mu B/kT) - kT/\mu B$. Ее график представлен на рис. 11.1, где использовано обозначение $\gamma = \mu B/kT$. На этом же рисунке указаны измеренные или предполагаемые значения γ для «компасов» у бактерий, морских водорослей и рабочих пчел. В работах Frankel et al., 1979 и Frankel, Blakemore, 1980 проведено прямое определение магнитного момента типичной магнитотаксической бактерии на основе данных об объеме магнетита, содержащегося в однодоменных кристаллах. Такой же результат получен в работе Kalmijn, 1981, где сравнивались средние скорости движения бактерии в полях разной напряженности со скоростями, вычисленными с помощью функции Ланжевена.

Аналогичный подход был применен в работе Lins de Barros et al., 1981 к магнитотаксическим водорослям. В результате было найдено, что магнитный момент (и значение γ) для водорослей примерно в 10 раз больше, чем для бактерий. И наконец, было проведено сравнение точности определения направления пчелами с соответствующей дисперсией, задаваемой функцией Ланжевена; полученная оценка магнитного момента рецепторов пчел отвечала значению $\gamma = 6$ (Kirschvink, 1981). Несмотря на такой широкий разброс значений магнитного момента, средняя степень ориентации (определяемая функцией Ланжевена) изменяется незначительно: от 0,82 для пчел до 0,94 для бактерий и 0,99 для водорослей. Как легко видеть из рис. 11.1, «компасные» органеллы с размерами меньшими, чем у пчел, будут ориентироваться в магнитном поле слишком слабо. По-видимому, бактериальные клетки и водоросли должны обладать столь большим магнитным моментом потому, что иначе вращающий момент ($\mu \times B$) будет слишком мал для осуществления быстрой ориентации этих довольно крупных клеток в геомагнитном поле (Frankel, Blakemore, 1980; Lins de Barros et al., 1981). При этом на клетки водорослей должен действовать больший вращающий момент, поскольку их диаметр (~ 5–10 мкм) и площадь поверхности значительно больше, чем у типичных бактерий (с размерами 1–2 мкм). Применяя эти аргументы к случаю «компаса» малых размеров у пчел, мы можем предположить, что с магнитной частицей или с цепочкой таких частиц связано в данном случае лишь небольшое количество органического материала. Итак, можно утверждать, что способность к ориентации в магнитном поле, проявляемая бактериями, водорослями и пчелами, согласуется с ферромагнитным механизмом магниторецепции.

11.2. «Магнитное чувство», характеризующееся высоким разрешением

Магнитное чувство, характеризующееся высоким разрешением, по сравнению со способностью к ориентации в магнитном поле обнаружено у меньшего числа видов; все же его существование убедительно доказано для многих видов птиц (см. гл. 22) и рабочих пчел (см. гл. 18). Объяснить механизм чувствительности к очень малым ($< 10^{-4}$) возмущениям геомагнитного поля весьма непросто.

Йорк (Yorke, 1981) и Киршвинк и Гоулд (Kirschvink, Gould, 1981) независимо попытались решить эту задачу в рамках ферромагнитной гипотезы механизма магниторецепции. Оба подхода аналогичны в том отношении, что основаны на предположении о наличии в организме животного большого числа магнетитных рецепторов, передающих информацию нервной системе, где она перерабатывается и усредняется. В принципе количество содержащегося в организме магнетита достаточно для реализации такого способа магниторецепции. Йорк развивает свой подход в настоящей книге (гл. 10). В этой главе мы рассмотрим некоторые приложения гипотезы, выдвинутой в работе Kirschvink, Gould, 1981, а также предложим некоторые экспериментальные способы ее проверки. Сначала, однако, представляется целесообразным обсудить различные механизмы, с помощью которых животные могут преобразовывать информацию о геомагнитном поле в форму, необходимую для двух- или многокоординатной навигации.

11.3. Магнитные ориентиры, использующиеся при построении «чувства карты»

Для объяснения механизма «чувства карты» у животных предлагались различные типы навигационных систем – от «карты знакомой местности», рассмотренной в работе Baker, 1978, до двухкоординатной карты с двумя независимыми компонентами (см., например, Quinn, 1982). Гипотеза «магнитной карты знакомой местности» предполагает, что животное создает магнитную топографическую карту местности, характеризующуюся средней напряженностью поля, его локальными градиентами или какими-либо функциями этих двух параметров, и определяет свое местоположение в незнакомой местности путем экстраполяции этих параметров (Gould et al., 1980). Какие системы могут для этого использоваться? «Чувство карты» может иметь чисто магнитную природу или формироваться в результате комбинации с другим (или другими) чувством. Здесь возможно множество вариантов, каждый из которых, как показано на рис. 11.2, может образовать одну из компонент навигационной «картографической сетки». Простейшей является такая система, в которой используется информация только о величине поля (случай А на рис. 11.2). Напряженность поля – это самый простой геомагнитный параметр, не зависящий от ориентации животного. Система магниторецепторных органелл, которые реагируют на напряженность поля, может обладать чрезвычайно высокой чувствительностью (Yorke, 1981; Kirschvink, Gould, 1981).

На следующем уровне каким-то образом комбинируются «магнитное» и «гравитационное» чувства. Этот вариант, по-видимому, реализуется в случае рассмотренного выше магнитного компаса птиц. Характеризующаяся высоким разрешением компонента «чувства карты» может формироваться путем отслеживания изменения угла между направлением поля и вертикалью (наклонение поля) и последующего интегрирования этого угла по времени (случай Б на рис. 11.2). Данная составляющая «чувства карты», по-видимому, характеризуется меньшей чувствительностью, чем компонента, основанная на измерении напряженности поля, поскольку нужно учитывать шум как магнитной, так и гравитационной систем.

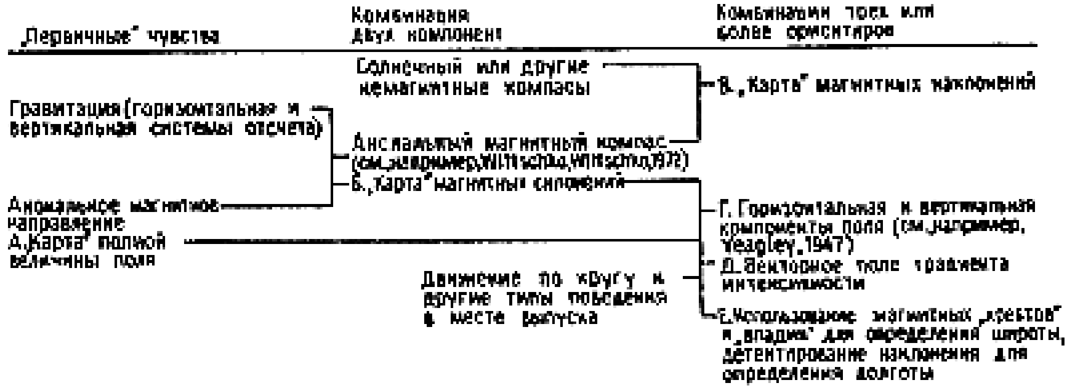


Рис. 11.2. Возможная иерархия геомагнитных ориентиров для навигационной двухкоординатной «карты».

На следующем и, вероятно, наименее чувствительном уровне «чувство карты» формируется путем комбинации трех или более компонент. Третьей компонентой может быть геомагнитное склонение или изменение вертикальной или горизонтальной составляющих магнитного поля (Yeagley, 1947). Для измерения склонения необходим магнитный компас, а также независимая система ориентации по солнцу или звездам. Хотя в такой сложной трехкомпонентной системе должен учитываться шум всех составляющих и она не может функционировать в облачную погоду или у рыб, мигрирующих подо льдом, эта система несколько расширяет возможности ориентирования, поскольку геомагнитное склонение сильно меняется с долготой, особенно на высоких широтах.

Другими компонентами на этом уровне могут быть горизонтальная и вертикальная составляющие поля и его наклонения (Yeagley, 1947). Неясно, правда, какую дополнительную информацию может при этом получить животное, поскольку декартовы координаты (горизонтальная и вертикальная компоненты) дают такое же количество информации, что и полярные (напряженность и наклонение). Кроме того, трудно представить себе такие «первичные» органеллы, которые могли бы непосредственно регистрировать горизонтальную и вертикальную компоненты поля; подобные органеллы должны были бы обладать одинаковой чувствительностью к силе тяжести и к магнитному полю. Например, достаточно большие магнетитные кристаллы, способные регистрировать поле тяжести, с необходимостью должны состоять из многих доменов, а такая система обладает малым эффективным магнитным моментом и, следовательно, не может использоваться в качестве рецепторов магнитного поля. Кроме того, магнитная энергия однодоменных кристаллов, находящихся в геомагнитном поле, превышает гравитационную энергию в $10^2 - 10^4$ раз; ясно, что эти два чувства разделены уже на уровне рецепторов.

И наконец, животные могут регистрировать малые изменения напряженности поля в том месте, где они были выпущены, и составлять «карту» градиента напряженности поля, которую они используют в качестве дополнительной компоненты навигационного механизма. Обнаружено, что такие животные, как почтовые голуби, мигрирующие черепахи и океанические рыбы, сразу после того, как их выпускают в незнакомой местности, перемещаются по круговым траекториям диаметром 100–200 м (Walcott 1978; Rudloe 1979); возможно, такое поведение связано с составлением «карты» градиента.

Океанические животные могут использовать даже более простой способ, основанный на присущих морям особенностях магнитного поля. В отличие от континентов геомагнитное поле в океанах имеет простую регулярную структуру, состоящую из вытянутых вдоль линии север – юг

«хребтов и впадин», образованных имеющимися в базальтовом морском дне участками с противоположными направлениями геомагнитного поля. Это позволяет животным следить за относительными смещениями вдоль линии восток – запад с помощью подсчета локальных максимумов или минимумов поля; информацию о положении вдоль направления север – юг дает регистрация магнитного наклонения. Животные, мигрирующие вдоль линии север – юг (например, финвалы в Атлантике), могут просто придерживаться магнитных «впадин». Так, Киршвинк и др. (в печати) обнаружили, что выбросы китовых на берег у восточного побережья США наблюдались преимущественно в тех местах, где такие «впадины» пересекают береговую линию.

Все сказанное выше позволяет сделать весьма правдоподобное предположение, что магнитная составляющая «чувства карты» может представлять собой любую функцию полной величины поля, а также его наклонения и склонения (мы перечислили параметры геомагнитного поля в порядке уменьшения вероятности их использования). Это предположение согласуется с наблюдениями Уолкотта и др. (Walcott et al., 1979) о том, что в организме почтовых голубей содержится 10^7–10^8 однодоменных магнетитных кристаллов, тогда как для определения направления поля достаточно 10^2–10^3. На магнетитные рецепторы, чувствительные к изменению наклонения или склонения, налагаются те же ограничения, вытекающие из теории Ланжевена, что и на рецепторы, использующиеся для определения направления поля. В следующем разделе мы рассмотрим соответствующий теоретический подход для случая органелл, чувствительных к напряженности поля. Этот подход обобщает модель тепловых флуктуаций, предложенную в работах Kirschvink, Gould, 1981 и Kirschvink, 1982.

2. Модель восприятия напряженности поля; тепловые флуктуации

Механизм восприятия напряженности геомагнитного поля (рис. 11.2) должен каким-то образом минимизировать влияние направления поля Земли и выделить лишь его абсолютную величину, подобно тому, как это происходит в магнитометре, основанном на прецессии протонов. Здесь возможны два подхода. В простейшем из них используются рецепторы, чувствительные лишь к некой функции напряженности поля. Суммарный сигнал от большого числа таких рецепторов также не будет зависеть от направления поля. Во втором подходе используются менее «совершенные» рецепторы, чувствительные и к напряженности поля, и к его направлению. Если имеется большое число таких структур со случайными пространственными ориентациями, то эффекты, связанные с направлением, после усреднения исчезнут и останется лишь зависящий от величины поля суммарный сигнал.

Однако восприятие полной величины поля, по-видимому, дает лишь

малый вклад в «чувство карты». Результаты работ Keeton et al., 1974 и Southern, 1978 о корреляции K-индекса проще объясняются чувствительностью к малым флуктуациям основного поля; эта интерпретация кажется еще более убедительной, если учесть данные о циркадианном ритме у пчел (Lindauer, 1977) и о влиянии магнитных аномалий на голубей (Walcott, 1978; Papi et al., 1978). Способность к восприятию небольших изменений основного поля не менее полезна для мигрирующих животных, чем чувствительность к самой величине поля.

Магнетитные рецепторы в принципе способны индуцировать сигнал, зависящий от величины поля. Малая частица, находящаяся в жидкой среде, поворачивается случайным образом под действием броуновского движения. В результате магнитный момент μ этой частицы отклоняется от направления внешнего поля B; плотность вероятности угла отклонения задается распределением Больцмана $\exp(\gamma \cos\theta)$. В достаточно сильном поле параметр $\gamma = \mu B/kT$ велик и μ ориентируется вдоль направления B. Рецептор, который «включается» в соответствии с некой периодической функцией от степени ориентации гранулы, будет индуцировать потенциал действия постоянной частоты. В слабых полях, когда γ мало, ориентация гранулы сильно меняется во времени и индуцируемый сигнал будет иметь нерегулярную частоту. Средняя частота включения рецептора содержит информацию о направлении поля, а характер колебаний около средней частоты зависит от его абсолютной величины. В работе Kirschvink, Gould, 1981 рассмотрено несколько конкретных конфигураций рецепторов, обладающих указанными свойствами.

Чувствительность систем такого типа сильно зависит от магнитного момента каждого рецептора. Оптимальным является такой магнитный момент, при котором малые флуктуации γ сопровождаются существенным изменением дисперсии распределения Больцмана. Компоненты дисперсии, параллельные и перпендикулярные внешнему полю, равны

$$\sigma_{\perp}^2 = (2/\gamma)\, L(\gamma), \tag{1}$$

$$\sigma_{\parallel}^2 = 1 - (2/\gamma)\, L(\gamma) - L^2(\gamma), \tag{2}$$

где $L(\gamma)$, как и раньше,– функция Ланжевена. Дифференцирование $\sigma_{\perp}$ и $\sigma_{\parallel}$ по γ дает

$$\frac{\partial \sigma_{\perp}}{\partial \gamma} = \frac{1}{\gamma \sigma_{\perp}} \quad L'(\gamma) - \frac{L(\gamma)}{\gamma} \quad , \tag{3}$$

$$\frac{\partial \sigma_{\parallel}}{\partial \gamma} = \frac{-1}{\sigma_{\parallel}} \left[L(\gamma)\, L'(\gamma) + \sigma_{\perp} \frac{\partial \sigma_{\perp}}{\partial \gamma} \right]. \tag{4}$$

Графики этих функций приведены на рис. 11.3. При очень малых моментах органелл, когда γ близко к нулю, и перпендикулярная, и параллельная компоненты (рис. 11.3, *А, Б*) стремятся к константам, равным соответственно $(2/3)^{1/2}$ и $(1/3)^{1/2}$. При таких условиях малые флуктуации γ не будут сопровождаться значительными изменениями дисперсии и рецептор будет недостаточно чувствителен. Аналогичная

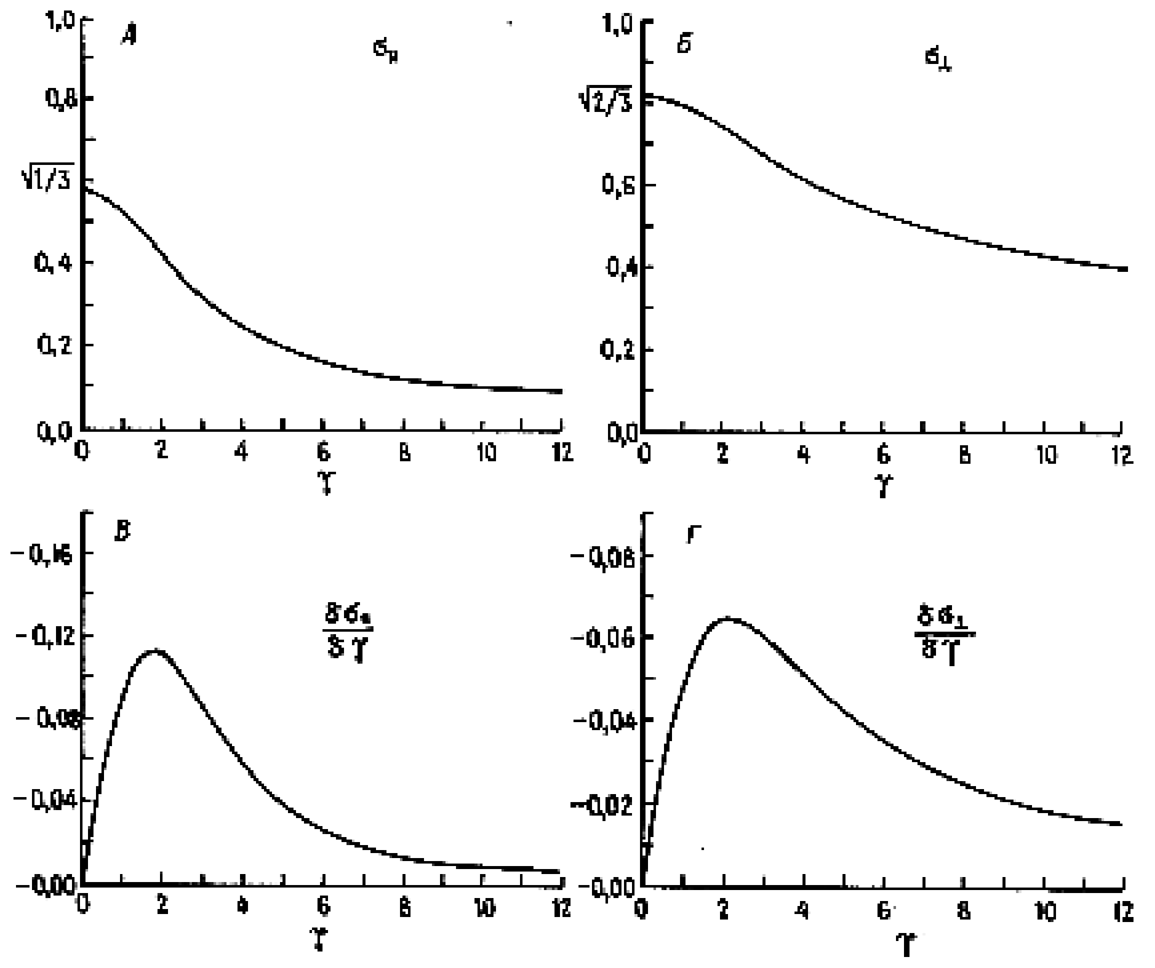


Рис. 11.3. Компоненты дисперсии функции Ланжевена и оптимальный магнитный момент для рецептора интенсивности поля. На рис. *А* и *Б* представлены графики для параллельной и перпендикулярной внешнему полю компонент, соответствующие функциям (1) и (2). Оптимальный момент рецептора определяется из условия, что эти функции наиболее сильно меняются при малых изменениях γ. На рис. *В* и *Г* представлены графики соответствующих производных [функции (3) и (4)]. Оба они имеют максимум вблизи $\gamma = 2$. Поскольку $\Delta\gamma$ [соотношение (6)] зависит от σ/σ', область оптимальных значений γ несколько уширяется и смещается в сторону увеличения γ.

ситуация наблюдается и в случае больших магнетитных кристаллов, когда γ велико и тепловые отклонения асимптотически стремятся к нулю. Как легко видеть из рис. 11.3, *В* и *Г*, в обоих случаях оптимальному значению магнитного момента соответствует $\gamma = 2$, что в несколько раз меньше значения, полученного выше для рецепторов «компаса». Отметим, что этот результат не зависит от того, каким образом осуществляется связь между гранулами магнетита и нервной системой; любая система, подверженная тепловым флуктуациям, должна подчиняться аналогичным ограничениям.

Чувствительность такого устройства можно прямо оценить. Пусть $f(\gamma)$ – типичный сигнал, индуцируемый одним из рецепторов, а $\sigma(\gamma)$ – стандартное отклонение (σ^2 равно дисперсии). Суммирование по всем рецепторам приводит к уменьшению стандартного отклонения в $N^{1/2}$

раз. Поворот каждой гранулы осуществляется за характерное время τ; интегрирование сигналов за время t улучшает временно́е разрешение устройства в $(t/\tau)^{1/2}$ раз. Чувствительность устройства к малым флуктуациям $\Delta\gamma$ можно оценить, если предположить, например, что организм способен реагировать на изменение среднего сигнала, равное одному стандартному отклонению:

$$\frac{\sigma(\gamma)}{[N(t/\tau)]^{1/2}} = f(\gamma + \Delta\gamma) - f(\gamma). \tag{5}$$

Разделив обе части на $\Delta\gamma$ и предположив, что $\Delta\gamma \ll \gamma$, находим

$$\frac{\sigma(\gamma)}{\Delta\gamma\,[N(t/\tau)]^{1/2}} = \frac{f(\gamma + \Delta\gamma) - f(\gamma)}{\Delta\gamma} = f'(\gamma),$$

откуда

$$\Delta\gamma = \frac{\sigma(\gamma)}{f'(\gamma)\,[N(t/\tau)]^{1/2}}. \tag{6}$$

Как и следовало ожидать, чувствительность можно улучшить, увеличив число органелл N и отношение t/τ или максимизировав $f'(\gamma)$ путем подбора γ. Сами функции $f(\gamma)$ и $\sigma(\gamma)$ определяются, конечно, конкретной моделью. Согласно обсуждавшейся выше модели регистрации напряженности поля, функция $f(\gamma)$ зависит от соответствующих компонент смещений магнетитных гранул, обусловленных тепловым движением (рис. 11.3, *А* и *Б*). Тогда функция $f'(\gamma)$ должна иметь вид, представленный на рис. 11.3, *В* или 11.3, *Г*. Чувствительность к изменению магнитного поля ΔB при постоянной температуре будет равна $\Delta\gamma kT/\mu$ или $B\Delta\gamma/\gamma$. Это означает, что устройство, содержащее 10^8 гранул (величина, полученная для голубей; Walcott et al., 1979), с временем усреднения 3,5 с (~ 100τ) в состоянии зарегистрировать изменение вертикальной составляющей поля менее 1 нТл, что согласуется с данными работ Yorke, 1981 и Kirschvink, Gould, 1981.

В заключение следует отметить, что рассмотренное нами устройство должно быть чувствительно также к малым флуктуациям температуры. Если напряженность магнитного поля постоянна, то изменение температуры ΔT, которое может зарегистрировать наше устройство, равно $-T\Delta\gamma/\gamma$, где $\Delta\gamma$ задается соотношением (6). В случае голубей это соответствует изменению 0,006°С за 3,5 с (~ 100τ). Таким образом, эффект малых флуктуаций температуры может быть принят за эффект изменения магнитного поля, если только не используется независимая система коррекции со специальными терморецепторами. Представляется, однако, что тепловая инерция птиц достаточно велика для эффективного демпфирования внешних температурных изменений среды. Например, Торре-Буэно (Torre-Bueno, 1976) проследил с помощью радиотелеметрии за температурой тела скворца, пролетающего по подогреваемому туннелю. При резком изменении температуры от повышенного

значения 35°С к более нормальному 16°С скорость изменения температуры тела скворца оказалась равной 1°С/мин (0,05°С/100τ). Это примерно в 8 раз больше теоретической оценки чувствительности к изменениям температуры для рассмотренного выше примера с голубями, однако сравнимо с величиной, которую мы получили бы, если бы изменение магнитного поля составляло 10 нТл. Однако в естественных условиях птицы редко подвергаются действию таких температурных скачков; типичные изменения температуры обычно гораздо меньше. Такие температурные эффекты вряд ли будут существенны для крупных позвоночных, особенно если рецепторы находятся в тепловом равновесии с большими объемами жидкостей тела (кровь, спинномозговая жидкость).

С другой стороны, Мартин и Линдауэр (Martin, Lindauer, 1977) обнаружили влияние температуры на поведение пчел в магнитном поле. Впрочем, сами они объясняли свои результаты как подтверждение парамагнитного механизма чувствительности к магнитному полю. Следует учитывать, однако, что пчелы – довольно мелкие животные и обладают меньшей тепловой инерцией.

3. Обсуждение

На основании всего сказанного выше можно предположить, что важным параметром, разграничивающим две сенсорные функции, которые может выполнять магниторецептор, – определение направления поля или определение его абсолютной величины, – служит значение магнитного момента соответствующей органеллы. Это предположение можно проверить, сравнив отношение $\mu B/kT$ для магнетитных кристаллов, обнаруженных у голубей, пчел, рыб и т. д. Такое сравнение удобно производить с помощью диаграммы Батлера – Банерджи, представленной на рис. 11.4. Каждая точка на диаграмме задает размер и форму магнетитного параллелепипеда, так что его магнитный момент также фиксирован. На рис. 11.4 нанесены три пунктирные линии, отвечающие постоянным значениям магнитного момента гранул и соответствующие $\gamma = 0{,}1$, 1 и 10, причем предполагается, что гранула находится в геомагнитном поле (50 мкТл, или 0,5 Гс) при температуре тела животного (310 К). Как видно из диаграммы, в случае голубей и рыб бóльшая часть кристаллов находится в области несколько ниже кривой $\gamma = 1$, так что они слишком малы, чтобы служить «компасными» органеллами (рецепторами направления поля), а у голубей – даже рецепторами напряженности.

Существуют по крайней мере два способа формирования систем с достаточно большим магнитным моментом. Это могут быть отдельные крупные кристаллы. Но если их число не слишком мало (не менее ~ 10 000), их можно было бы выявить с помощью магнитометрии. Интересно отметить, однако (Yorke, 1979; Kirschvink, Gould, 1981), что для создания очень чувствительного «компаса» достаточно 1 000 однодоменных магнетитных кристаллов, а такое малое их число невозможно

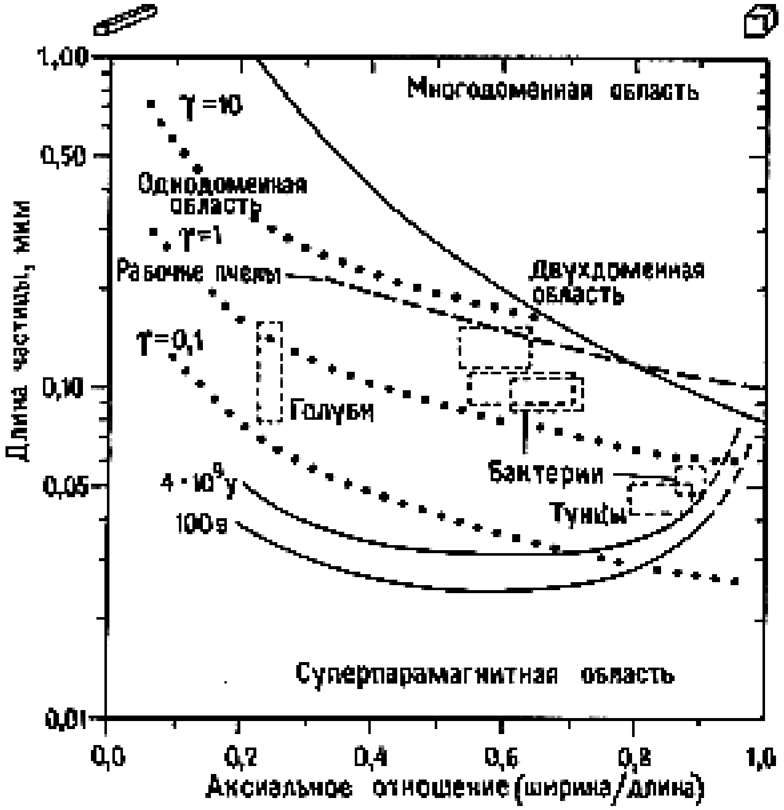


Рис. 11.4. Диаграмма Батлера – Банерджи для частиц магнетита, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда (Butler, Banerjee, 1975; Kirschvink, Gould, 1981). Сплошные линии указывают теоретически и экспериментально определенные границы между областями, где находятся многодоменные, однодоменные и суперпарамагнитные кристаллы. Три пунктирные линии, пересекающие однодоменную и суперпарамагнитную области, – это кривые, отвечающие постоянному объему гранулы и, следовательно, постоянному магнитному моменту μ. Они соответствуют значениям $\gamma = \mu B/kT$, равным 0,1, 1 и 10 при комнатной температуре в геомагнитном поле.

выявить с помощью существующих в настоящее время магнитометров. Необходимо выделить кристаллы из организма и найти их распределение по размерам. С другой стороны, если указанные на рис. 11.2 системы Б, В и Г используются в сочетании с А или как отдельные компоненты «чувства карты», то число таких «компасных» гранул может быть больше, хотя все еще недостаточно для их прямого детектирования.

Второй способ, с помощью которого можно увеличить магнитный момент рецепторных органелл, состоит в соединении кристаллов в цепочки, при котором их магнитные моменты складываются. Как показывают электронно-микроскопические исследования (Walcott et al., 1979), кристаллы действительно могут группироваться в цепочки из нескольких частиц, так что их полный магнитный момент оказывается сравнимым с магнитным моментом, которым должен обладать рецептор, чувствительный к напряженности поля. Достаточно длинные цепочки обнаружены пока только у магнитотаксических бактерий (Balkwill et al., 1980), хотя не исключено, что в процессе экстрагирования длинные

цепочки разрушаются. Как и крупные кристаллы, длинные цепочки должны выявляться при изучении взаимодействия между гранулами. Уокер и др. (Walker et al., 1984; см. также гл. 10) продемонстрировали наличие такого эффекта у рыб. Обладают ли цепочки достаточным моментом, чтобы служить «компасными» рецепторами, неизвестно, но если обладают, то можно предположить, что «компас» имеет более высокое разрешение, чем это следует из поведенческих данных.

Адекватность высказанных гипотез можно также проверить, изучая поведение животных. Киршвинк (Kirschvink, 1981) показал, что данные работ Martin, Lindauer, 1977 и Gould et al., 1980 о горизонтальном танце пчел можно объяснить наличием однодоменных ферромагнитных частиц с $\gamma \approx 6$. При таком значении момента рецептора зависимость точности ориентации танца от величины внешнего поля количественно согласуется с функцией Ланжевена, отклоняясь от нее в слабых полях и асимптотически приближаясь к ней с увеличением поля. Значение магнитного момента можно найти из формы кривой. Для компасного рецептора пчелы этот момент равен $\sim 9 \cdot 10^{-16}$ $А^{5} \cdot м^{2}$.

Аналогичная проверка может оказаться возможной и в случае рецепторов, ответственных за чувствительность к величине поля, когда будут в достаточной степени разработаны поведенческие подходы к определению чувствительности к малым флуктуациям поля (например, изучение циркадианных ритмов у пчел; Lindauer, 1977). Как мы уже говорили, оптимальным является такой размер гранулы – рецептора величины поля, при котором наиболее сильно меняется дисперсия распределения Больцмана при малых изменениях γ (рис. 11.3). Для естественных геомагнитных полей магнитный момент рецептора оптимален при $\gamma = 2$. По мере удаления от этого значения чувствительность рецептора должна ухудшаться. Поэтому измерения пороговой чувствительности к малым изменениям величины поля в некоторой области значений внешнего поля аналогичны построению графика зависимости $\partial\theta/\partial\gamma$ от γ при оптимизации γ, что позволяет оценить γ.

Как отмечено в гл. 16, биоминерализация магнетита происходит в органических матрицах, которые, по-видимому, задают размер и форму кристаллов. Магнетитные кристаллы, обнаруженные у таких разных организмов, как бактерии, хитоны и тунцы, очень близки друг к другу по размерам и форме. Отдельные кристаллы обладают слишком малым моментом, чтобы бактериальные клетки могли ориентироваться в магнитном поле, но если эти кристаллы объединятся в цепочки, то суммарный момент будет уже достаточно большим (Frankel, Blakmore., 1980). Отсюда следует, что необходимый для ориентации магнитный момент и, следовательно, длина цепочек из магнетитных кристаллов должны зависеть от размера клетки. У крупных клеток должны быть и более длинные цепочки. Возможно, цепочки магнетитных кристаллов оптимальной длины у одноклеточных организмов сформировались в результате естественного отбора.

Кристаллы магнетита, обнаруженные у многоклеточных организмов,

также одинаковы по размерам и форме в пределах одного вида. Реакции животного на магнитное поле разделяются на «компасную» и «топографическую», что легко объяснить с помощью гипотезы магниторецепции, основанной на использовании магнетита. Из данной гипотезы следует, что в соответствии с этим существуют два оптимальных значения магнитного момента рецепторов. Такими моментами могут обладать либо кристаллы существенно различающихся размеров, либо цепочки разной длины, состоящие из одинаковых кристаллов. Как и в случае бактерий и водорослей, мы можем предположить, что у многоклеточных организмов магниторецепторы тоже сформировались под действием естественного отбора и их размер и форма находятся под строгим генетическим контролем. В результате используются рецепторы с одинаковыми магнитными моментами, даже если магнетитные кристаллы этих рецепторов у разных видов животных имеют неодинаковые размеры или образуют цепочки разной длины. Эти вопросы еще ждут своих исследователей.

4. Краткое содержание

Многочисленные эксперименты по изучению поведения животных показывают, что многие животные обладают способностью чувствовать геомагнитное поле. Известно также, что многие из этих организмов способны к биохимическому накоплению магнетита, с помощью которого может осуществляться передача информации о геомагнитном поле к нервной системе. Из опытов по изучению поведения животных следует, что существуют по крайней мере два типа магниторецепции: один из них ответствен за определение направления поля, а другой – за чувствительность к малым флуктуациям его абсолютной величины. Из модели магниторецепции, учитывающей тепловые возмущения, следует, что магнитные моменты соответствующих органелл могут различаться по размеру в три или более раз, что приводит к различным поддающимся проверке предсказаниям.

Благодарности. Мы очень признательны Джону Д. Моргану III, Джеймсу Л. Гоулду, Джорджу Карману и Марку Малдуну за полезные обсуждения. Настоящая работа выполнена при поддержке Национального научного фонда (США), Grants SPI 79-1485, PCM 82-03627, BNS 83-00301, PYI-8351370. This is Contribution No 4135 from the Division of Geological and Planetary Sciences California Institute of Technology.

Литература

Baker R. R., 1978; The Evolutionary Ecology of Animal Migration, Hodder and Stoughton, London.

Balkwill D. L., Maratea D., Blakemore R. P. (1980). Ultrastructure of a magnetotactic spirillum, J. Bacteriol., 141, 1399–1408.

Blakemore R. P. (1975). Magnetotactic bacteria, Science, **190**, 377–379.

Butler R. F., Banerjee S. K. (1975). Theoretical single-domain grain size in magnetite and titanomagnetite, J. Geophys. Res., **80**, 4049–4058.

Frankel R. B., Blakemore R. P. (1980). Navigational compass in magnetic bacteria, J. Magn. Magn. Mater., **15–18**, 1562–1564.

Frankel R. B., Blakemore R. P., Wolfe R. S. (1979). Magnetite in freshwater magnetotactic bacteria, Science, **203**, 1355.

Gould J. L., Kirschvink J. L., Deffeyes K. S., Brines M. L. (1980). Orientation of demagnetized bees, J. Exp. Biol., **86**, 1–7.

Kalmijn A. J. (1981). Biophysics of geomagnetic field detection, IEEE Trans. Magn., **Mag-17**, 1113–1124.

Kalmijn A. J. (1982). Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes, Science, **218**, 916–918.

Keeton W. T., 1972. Effects of magnets on pigeon homing. In: Animal Orientation and Navigation (S. R. Galler, K. Schmidt-Koenig, G. J. Jacobs, and R. E. Belleville, eds.), NASA SP-262, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., pp. 579–594.

Keeton W. T., Larkin T. S., Windsor D. M. (1974). Normal fluctuations in the earth's magnetic field influence pigeon orientation, J. Comp. Physiol., **95**, 95–103.

Kirschvink J. L. (1981). The horizontal magnetic dance of the honeybee is compatible with a single-domain ferromagnetic magnetoreceptor, BioSystems, **14**, 193–203.

Kirschvink J. L. (1982). Birds, bees and magnetism: A new look at the old problem of magnetoreception, Trends Neurosci., **5**, 160–167.

Kirshvink J. L., Gould J. L. (1981). Biogenic magnetite as a basis for magnetic field sensitivity in animals, BioSystems, 13, 181–201.

Kirschvink J. L., Dizon A. E., Westphal J. A., 1985. Evidence from strandings for geomagnetic sensitivity in cetaceans, J. Exp. Biol., in press.

Lindauer M., 1977. Recent advances in the orientation and learning of honeybees, Proc. Int. Entomol. Congr., pp. 450–460.

Lins de Barros H. G. P., Esquivel D. M. S., Danon J., Oliveira L. P. H., 1981. Magnetotactic algae, Acad. Bras. Cienc. Notas Fis. CBPF-NF-048/81.

Martin H., Lindauer M. (1977). Der Einfluss des Erdsmagnetfeldes auf die Schwereorientierung der Honigbiene (*Apis mellifica*), J. Comp. Physiol., **122**, 145–187.

Papi F., Ioala P., Fiaschi V., Benvenuti S., Baldaccini N. E., 1978. Pigeon homing: Gues detected during the outward journey influence initial orientation. In: Animal migration, Navigation, and Homing (K. Schmidt-Koenig and W. T. Keeton, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 65–77.

Phillips J. B. (1977). Use of the earth's magnetic field by orienting cave salamanders (*Eurycea lucifuga*), J. Comp. Physiol. A, **121**, 273–288.

Phillips J. B., Adler K., 1978. Directional and discriminatory responses of salamanders to weak magnetic fields. In: Animal Migration, Navigation, and Homing (K. Schmidt-Koenig and W. T. Keeton, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 325–333.

Quinn T. P. (1980). Evidence for celestial and magnetic compass orientation in lake migrating sockeye salmon fry, J. Comp. Physiol., **137**, 243–248.

Quinn T. P. (1982). Use of celestial and magnetic cues by orienting sockeye salmon smolts, J. Comp. Physiol. A, **147**, 547–552.

Quinn T. P., Merrill R. T., Brannon E. L. (1981). Magnetic field detection in sockeye salmon, J. Exp. Zool., **217**, 137–142.

Rudloe J. J., 1979. Time of the Turtle, Random House, New York.

Southern W. E., 1978. Orientation responces of ring-billed chicks: A re-evaluation. In: Animal Nigration, Navigation, and Homing (K. Schmidt-Koenig and W. T. Keeton, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 311–317.

Tesch F. W., 1975. Fishes: orientation in space. In: Marine Ecology: A Comprehensive Integrated Treatise on Life in Oceans and Coastal Waters, Vol. 2 (O. Kinne, ed.), Wiley, New York, p. 657.

Tesch F. W. (1980). Migratory performance and environmental evidence of orientation. In: Environmental Physiology of Fishes (N. A. Ali, ed.), NATO Adv. Study Inst. Ser. A, Life Science, 35, 589–612.

Torre-Bueno J. R. (1976). Temperature regulation and heat dissipation during flight in birds, J. Exp. Biol., **65**, 471–482.

Vine F. J. (1966). Spreading of the ocean floor: New evidence, Science, **154**, 1405–1415.

Walcott C., 1978. Anomalies in the earth's magnetic field increase the scatter of pigeon's vanishing bearings. In: Animal Migration, Navigation, and Homing (K. Schmidt-Koenig and W. T. Keeton, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 143–151.

Walcott C., Green R. P. (1974). Orientation of oming pigeons altered by a change in the direction of an applied magnetic field, Science, **184**, 180.

Walcott C., Gould J. L., Kirschvink J. L. (1979). Pigeons have magnets, Science, **205**, 1027–1029.

Walker M. M., Kirschvink J. L., Chang S.-B. R., Dizon A. E. (1984). A candidate magnetic sense organ in the yellow fin tuna, Thunnus albacares, Science, **244**, 751–753.

Wiltschko W., 1972. The influence of magnetic total intensity and inclination on directions preferred by migrating European robins. In: Animal Orientation and Navigation (S. R. Galler, K. Schmidt-Koenig, G. J. Jacobs, and R. E. Belleville, eds.), NASA SP-262, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., pp. 569–578.

Wiltschko W., Wiltschko R. (1972). Magnetic compass of european robins, Science, **176**, 62–64.

Yeagley H. L. (1947). A preliminary study of a physical basis of bird navigation, J. Appl. Phys., **18**, 1035–1063.

Yorke E. D. (1979). A possible magnetic transducer in birds, J. Theor. Biol., **77**, 101–105.

Yorke E. D. (1981). Sensitivity of pigeons to small magnetic field variations, J. Theor. Biol., **89**, 533–537.

Глава 12

СУЩЕСТВУЮТ ЛИ У ЖИВОТНЫХ МАГНИТНЫЕ КАРТЫ?

Джеймс Л. Гоулд[1]

1. Введение

Многие животные перемещаются на большие расстояния по направлению к относительно небольшим целям (см. обзор Gould, 1982a). Например, рабочие пчелы отваживаются улетать на 15 км от улья и без труда находят обратную дорогу; огромное количество бабочек-монархов пролетают тысячи километров, чтобы из восточной части Соединенных Штатов попасть в горные леса в Мексике; зеленые морские черепахи, которые выводятся на крохотном острове Вознесения, возвращаются сюда взрослыми животными после того, как несколько лет кормятся на расстояниях в тысячи километров от места рождения; многие виды птиц регулярно мигрируют между определенными летними и зимними территориями, а почтовые голуби возвращаются домой, даже если их увезти за сотни километров от него. Способность всех этих животных к навигации сравнительно слабо зависит от того, закрывают ли облака небесные ориентиры, и возникает вопрос: не обладают ли животные «чувством карты».

«Чувством карты» мы называем способность животного определять, где оно находится относительно цели своего путешествия. Это чувство может быть основано либо на информации, накопленной во время путешествия от цели, либо на знании каких-то ориентиров на земле, либо на способности определить местоположение независимо от этих видов информации. Прекрасный пример простейшей картографической системы дают нам рабочие пчелы. Они могут определять свое местоположение двумя способами. Первый известен как «маршрутная» навигация: при полете от улья пчела-сборщица следит за расстоянием и направлением каждого отрезка своего маршрута (см. обзор von Frisch, 1967; Gould, 1982a). (Как мы увидим ниже, для определения направления она обычно использует «солнечный» азимут, хотя у нее имеется не-

[1] *James L. Gould*, Department of Biology, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544.

сколько альтернативных систем, которыми она пользуется в облачную погоду.) В то же время пчела учитывает влияние ветра и суточное движение солнца. Когда после сбора пчела возвращается в улей, она складывает векторно все отрезки своего маршрута и направляется прямо к цели. Вся информация, необходимая для возвращения, накапливается ею при полете от улья. Следовательно, если отнести молодую пчелу на некоторое расстояние от улья и затем выпустить, то она не сможет вернуться домой. В то же время опытная пчела, выпущенная в знакомом месте, возвращается в улей. По-видимому, пчелы строят «мысленную» карту, когда исследуют окрестность улья в поисках пищи, и при необходимости «вспоминают» ее. Строится ли такая внутренняя, основанная на опыте карта при других, не «маршрутных» способах навигации – пока неизвестно.

Есть ли основания полагать, что другие животные используют какие-либо иные механизмы навигации, чем пчелы? Ясно, что способность ориентироваться в знакомой местности не может объяснить, как морские черепахи находят дорогу в океане или каким образом почтовые голуби, перевезенные в закрытых клетках, возвращаются домой. Еще труднее объяснить поведение бабочек-монархов, поскольку большинство из них ранее никогда не было у цели своего путешествия и не может иметь «маршрутной» информации. Этот вопрос, по-видимому, можно считать решенным только в случае такого широко применяющегося при изучении навигации вида, как почтовые голуби. Чтобы использовать «маршрутную» информацию, голубь должен выбрать либо (1) инерциальную стратегию, «измеряя» ускорения, замедления и углы поворотов с последующим «вычислением» полного смещения, либо (2) «компасную» стратегию, определяя направление каждого отрезка пути и оценивая тем или другим способом расстояние.

Инерциальную стратегию, по-видимому, можно исключить, поскольку голуби с удаленными или перерезанными полукружными каналами – органами, с помощью которых измеряются эти инерциальные параметры,– успешно возвращаются домой (Hachet-Souplet, 1941; Huizinger, 1935; Wallraff, 1965, 1972; Keeton, 1974a). Аналогичным образом голуби и другие птицы, которых перевозили в состоянии глубокой анестезии (Kluijver, 1935; Griffin, 1943; Walcott, Schmidt-Koenig, 1973) или постоянно вращали во время перевозки (Griffin, 1943; Wallraff, 1980a, b), без труда находят свой дом. «Компасная» стратегия также кажется на первый взгляд маловероятной, поскольку голуби всегда возвращаются домой после транспортировки в условиях, когда они не могут пользоваться небесными ориентирами (см. обзор Keeton, 1974a), и даже когда они помещены в искусственное магнитное поле, что, казалось бы, мешает им получить информацию о геомагнитном поле (Keeton, 1974b; Wallraff, 1980a, b). Однако на это есть два возражения. Во-первых, в большинстве экспериментов голубь может определить направление геомагнитного поля, несмотря на наличие сильного искусственного поля, создаваемого прикрепленными к его телу магнитами, если он проделает определенную

совокупность операций. Например, если птица «чувствует» интенсивность поля в направлении оси своего тела, то, совершив полет по кругу и определив направление поля с максимальной и минимальной напряженностью, она может найти направление север – юг. Во-вторых, изучение «компасной» ориентации показывает, что обычно для ее осуществления могут использоваться по крайней мере две разные системы и устранение одной из них никак не сказывается на поведении, поскольку автоматически включаются другие системы. Если это так, то невозможно в одном и том же эксперименте устранить и инерциальную, и компасную информацию, т.е. нельзя исключить вероятность использования голубями обоих способов ориентации. Тем не менее в настоящее время большинство исследователей склонны считать, что голуби при навигации используют «чувство карты», основанное главным образом на информации, получаемой в том месте, где они были выпущены, и мы далее будем придерживаться этой концепции.

2. «Компасное чувство»

Как мы уже говорили, один из важнейших выводов, которые можно сделать из данных по изучению навигации животных, состоит в том, что животные часто (практически всегда) могут использовать разные способы ориентации в зависимости от того, какие ориентиры им доступны. Для пчел, у которых впервые была обнаружена такая иерархическая структура способов ориентации, основным ориентиром является солнце (von Frisch, 1967; Gould, 1982a); информация другого рода обычно не используется. Однако если солнца не видно, пчелы автоматически «переключаются» на другой ориентир – поляризацию ультрафиолетового света, идущего от голубого неба, и сохраняют способность к навигации (см. обзор von Frisch, 1967, а также Brines, 1979). В облачную погоду пчелы переключаются на использование полученной ранее информации о положении солнца относительно хорошо заметных ориентиров на земле (Dyer, Gould, 1981). Поскольку пчелы сохраняют работоспособность в облачную погоду даже в отсутствие подходящих ориентиров на земле, они располагают, по-видимому, и другими механизмами, возможно, основанными на восприятии геомагнитного поля (Gould, 1982a).

Все эти данные о поведении пчел очень помогли при выяснении природы «компасного чувства» у птиц. Например, ранние эксперименты с голубями показали, что в облачную погоду они без труда находят дорогу домой, и это, как считалось, исключает использование небесных ориентиров (см. обзор Keeton, 1974a). Столь же легко голуби отыскивали дом и в том случае, когда к их телу были прикреплены магниты. Утверждалось, что эти эксперименты (проводившиеся, конечно, в солнечные дни) исключали использование магнитных ориентиров. Однако Китон весьма элегантным способом продемонстрировал, что голуби используют небесные ориентиры и геомагнитное поле как альтернативные варианты, причем более предпочтительным является ориентация

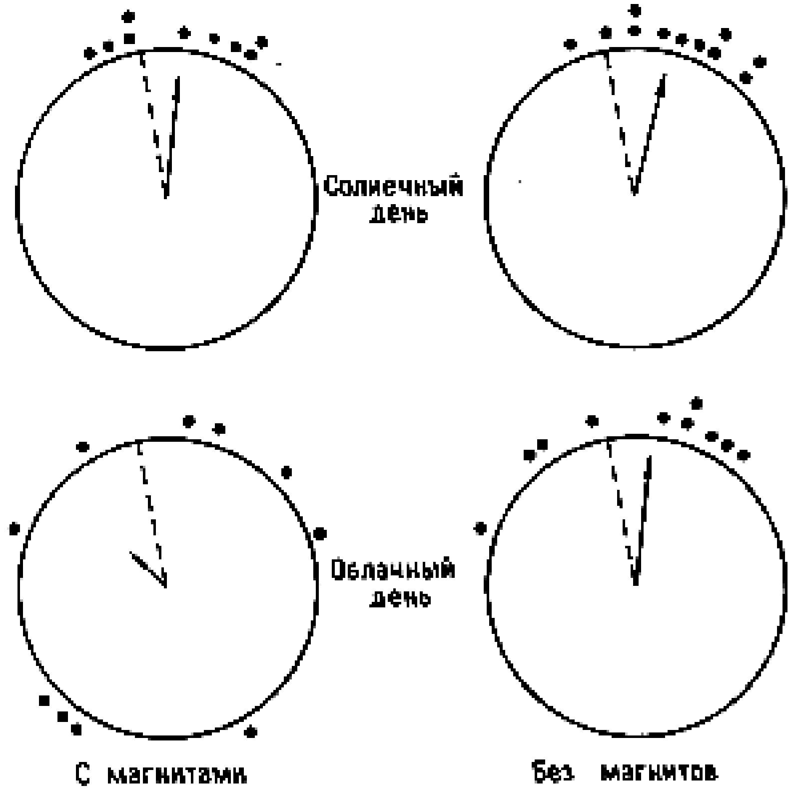


Рис. 12.1. В солнечные дни начальная ориентация голубей с прикрепленными к их телу магнитами и контрольных голубей, к которым вместо магнитов прикреплены латунные бруски такого же размера, практически одинакова. Штриховая линия – направление на дом, стрелка – «средний вектор» ориентации голубей, т. е. центр масс точек на краю окружности, каждая из которых представляет одного голубя. Группе идеально ориентирующихся голубей отвечал бы средний вектор, направленный на дом и доходящий до окружности, а группе плохо ориентирующихся птиц – короткий вектор с непредсказуемым направлением. Однако в облачную погоду голуби с магнитами ориентируются плохо, тогда как у голубей с латунными брусками способность к ориентации практически не меняется. Отсюда следует, что, когда это возможно, голуби ориентируются по солнцу, а в облачную погоду «переключаются» на «магнитный компас» (Keeton, 1974a).

по солнцу (Keeton, 1971). Именно поэтому магниты, прикрепленные к их телу, не оказывали способность находить дорогу домой в облачную погоду (рис. 12.1).

Изучение магнитного «компасного чувства» у птиц прошло в процессе своего развития несколько интересных этапов, которые мы обязательно должны иметь в виду и при рассмотрении «чувства карты». Эксперименты с голубями, у которых к голове и вокруг шеи были прикреплены две небольшие катушки (Walcott, Green, 1974), а также лабораторное изучение мигрирующих птиц (Wiltschko, Wiltschko, 1972) показали, что «север» для птиц означает направление, в котором силовые линии геомагнитного поля входят в поверхность Земли и совершенно не зависит от полярности поля. Далее, оказалось, что сначала голуби и другие птицы должны откалибровать свои компасные

системы, использующие небесные ориентиры, по магнитным компасным системам, и только после этого они могут ориентироваться по солнцу. Поэтому птицы, сталкивающиеся с противоречивыми указаниями на север, поступающими от «магнитной» и «небесной» систем, принимают за стандарт для калибровки «солнечного» азимута именно магнитный север (а можно было бы принять за «юг» направление на точку наивысшего подъема солнца), хотя в дальнейшем они не обращают внимания на свой магнитный компас, предпочитая ориентироваться по солнцу.

3. «Чувство карты»

Указания на роль магнитных ориентиров в формировании «чувства карты» были получены из самых разных источников, соответственно существует и несколько гипотез о построении «магнитной карты» (Yeagley, 1947; Gould, 1980, 1982b; Walcott, 1980a, 1982; Moore, 1980; Lednor, 1982). Чтобы понять значение всех имеющихся по этому поводу данных, мы должны сначала обсудить, какого типа информацию можно получить, опираясь на магнитные ориентиры. Геомагнитное поле изменяется более или менее регулярным образом от магнитного экватора (где магнитная стрелка располагается горизонтально и индукция поля равна примерно 25 000 нТл) к магнитным полюсам (где стрелка располагается вертикально и индукция равна примерно 60 000 нТл). Чтобы определить по магнитному полю широту, птицы должны уметь измерять с достаточной точностью скорость изменения поля. Например, на северо-востоке США наклонение меняется со скоростью примерно 0,01°/км, а индукция – со скоростью 3-5 нТл/км (ее горизонтальная и вертикальная составляющие изменяются примерно в два раза быстрее). Возникает вопрос: с какой точностью измеряют голуби эти величины? Наиболее четкий ответ на него был получен после проведения экспериментов, в которых голуби были лишены возможности видеть и должны были искать голубятню вслепую. Наблюдая с помощью радио за беспомощными блужданиями птиц вблизи голубятни, пролетевших до этого десятки или сотни километров (Schmidt-Koenig, Walcott, 1978), мы можем сделать вывод, что «чувство карты» позволяет определить местоположение с точностью примерно 5 км (рис. 12.2). Это соответствует чувствительности определения наклонения геомагнитного поля 0,05° и его величины 15-25 нТл (т. е. 30-50 нТл для одной из компонент поля). Как следует из данных гл. 3, животные, использующие магнитные ориентиры, должны испытывать трудности при навигации во время магнитных бурь, поскольку поле меняется при этом на величину от десятков до тысяч нанотесл. Такой эффект действительно наблюдается. Игли (Yeagley, 1951) показал, что время, за которое голуби находили дом в серии из девяти испытаний, проведенных в 1948 г. в Нью-Джерси, увеличивается с возрастанием солнечной активности. Такая же зависимость обнаружена при анализе результатов соревнования голубей в

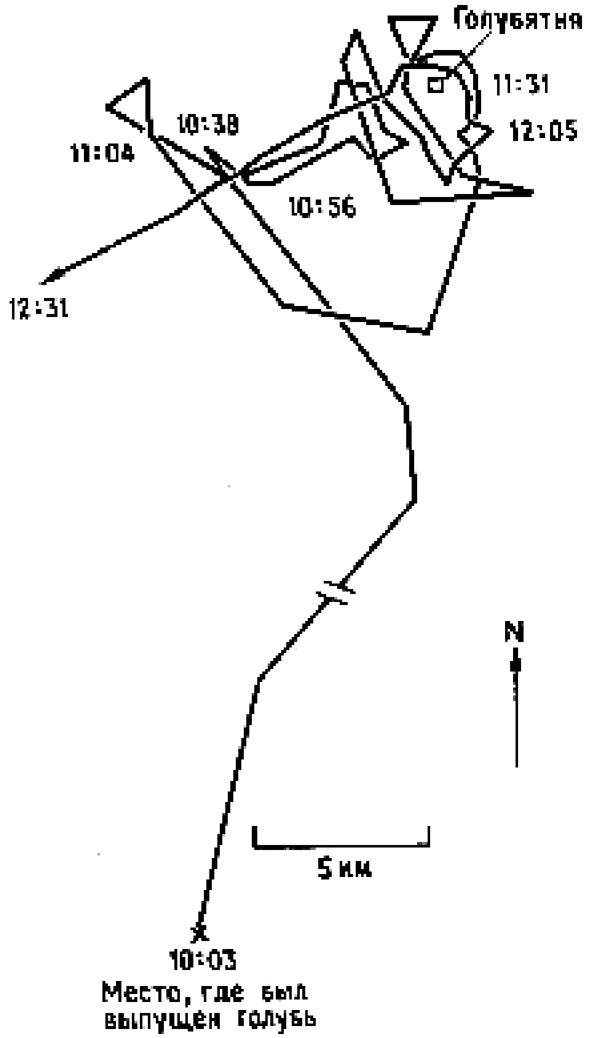


Рис. 12.2. Обычно птицы сверяют свой маршрут со знакомыми ориентирами на земле и летят прямо к голубятне. Если же их лишить возможности видеть (например, приморозив контактные линзы), то они будут беспорядочно блуждать вблизи голубятни. Из приведенных данных следует, что чувство «карты» голубей характеризуется разрешением 3-5 км (Schmidt-Koenig, Walcott, 1978).

Италии за 18 лет (Schreiber, Rossi, 1976, 1978, 1979). Детальное исследование результатов подобных соревнований в Америке, проходивших во время магнитной бури, показало, что, как и следовало ожидать, эффект сильнее проявляется для трасс восток-запад, чем для трасс север-юг (Carr et al., 1982). Поскольку указанные эффекты наблюдаются как в ясные дни, так и при облачной погоде и заметны даже при сравнительно слабых бурях, вряд ли они связаны с «компасным магнитным чувством».

Любопытно, что магнитные бури влияют также и на первоначальную ориентацию: выпущенные голуби отклоняются от правильного направления, определяемого по азимуту, тем больше, чем сильнее магнитная буря (Keeton et al., 1974). Это явление наблюдается и в солнечные дни, причем его величина много больше той, которую можно было бы ожидать в предположении о влиянии бурь на магнитную «компасную» систему. По-видимому, во время магнитной бури ухудшается оценка голубем своего местоположения (рис. 12.3). Аналогичным образом изменяется во время магнитных бурь направление перелета мигрирующих птиц (Moore, 1977). В обоих случаях пороговое значение изменения поля, при котором начинают проявляться указанные эффекты, находится в области 10-20 нТл, что соответствует минимальной чувствительности, ожидаемой для «магнитного чувства карты».

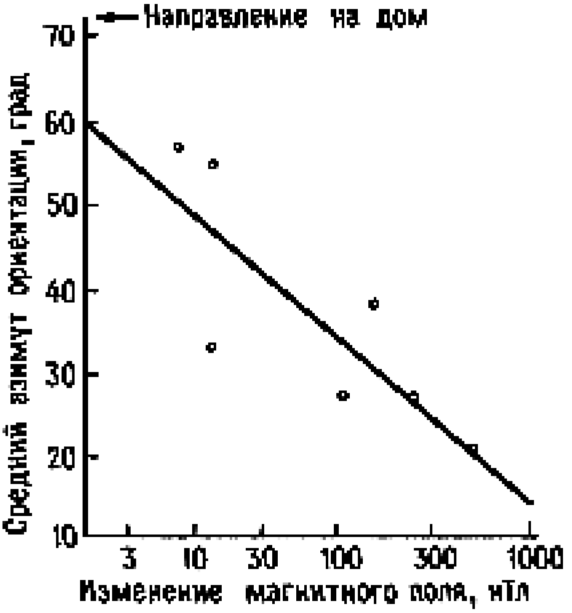


Рис. 12.3. Выпущенные голуби, как правило, систематически отклоняются вправо или влево от истинного направления на дом во время магнитной бури. Такие отклонения (продемонстрированные здесь для г. Кэмпбелл, шт. Нью-Йорк) меняются во времени в зависимости от силы магнитной бури (в данном случае усредненной по 12-часовому интервалу). Это, а также данные о результатах соревнований голубей (см. текст) позволяют предположить, что чувство, ответственное за определение местонахождения у птиц, нарушается во время магнитных бурь (Keeton et al., 1974).

Одна из очевидных проблем, с которой сталкиваются животные, использующие информацию о магнитном поле, состоит в том (см. гл. 3), что на изменения магнитного поля общего характера часто накладываются локальные возмущения. При построении магнитной карты голубь должен экстраполировать локальные градиенты поля вблизи голубятни, чтобы уметь определить свое местоположение на больших расстояниях от нее. Если локальный градиент нерепрезентативен, то неизбежно систематическое отклонение от истинного направления на дом. Более того, точность определения места освобождения зависит от того, в какой степени оно может быть подогнано к локальной «карте» поля. Следовательно, в восприятии голубя каждое место, где он был выпущен, характеризуется своим отклонением от направления на голубятню. Именно такая картина следует из фактических данных. Например, в окрестности города Итака (шт. Нью-Йорк) у всех голубей наблюдается одинаковая схема «отклонений»: к западу от проходящей через Итаку линии северо-северо-запад/юго-юго-восток отклонения направлены против часовой стрелки, а к востоку от этой линии – по часовой (рис. 12.4) (Windsor, 1972, 1975). Отсюда можно предположить, что если голуби используют магнитную картографическую информацию, то градиент магнитного поля на северо-западе Соединенных Штатов направлен на северо-северо-запад. Так оно и есть на самом деле, и на своих «картах» голуби систематически «перемещают» Итаку на северо-северо-запад от ее истинного положения (и тем самым «смещают» то место, где они были выпущены, на север или на юг от фактического). Аналогичные схемы отклонений, обусловленных наличием градиентов поля, наблюдались и для голубятен, расположенных в Линкольне, шт. Массачусетс (Walcott, частное сообщение), и во Франкфурте (Windsor, 1972; Grüter et al., 1982). В то же время для голубятни,

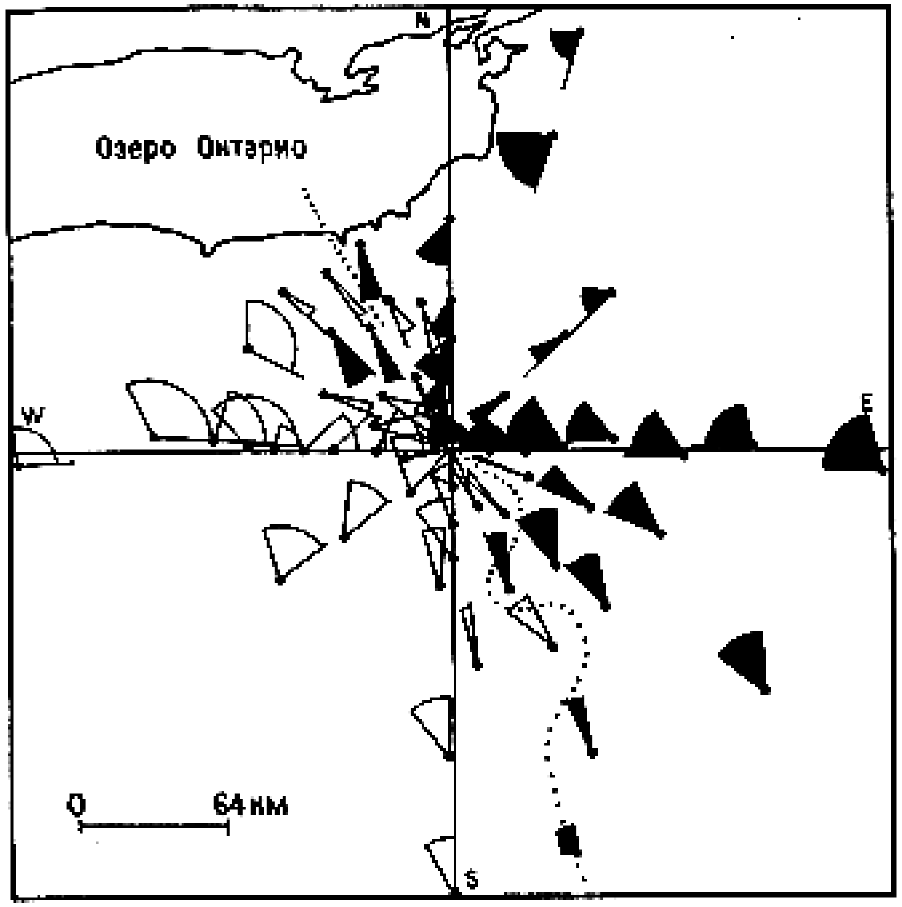


Рис. 12.4. Отклонения среднего «вектора ориентации» от истинного направления на дом для голубей, выпущенных в окрестностях Итаки, направлены по часовой стрелке к востоку от проходящей через Итаку линии «северо-северо-запад/юго-юго-восток» и против часовой стрелки – к западу от нее. (Отклонения по часовой стрелке показаны черным, а против часовой стрелки – белым). Эти, а также аналогичные данные для других голубятен (см. текст) приводят к выводу, что голуби систематически «перемещают» Итаку на северо-северо-запад от ее истинного положения (Windsor, 1975).

находящейся в Северной Каролине, никакой четко выраженной схемы отклонений не обнаружено (Windsor, 1972).

Если гипотеза о существовании у голубей магнитной карты верна, то на способность их к ориентации должны влиять магнитные аномалии – места, где напряженность поля и/или его градиент существенно отличаются от обычных. Такой эффект действительно обнаружен. Уолкотт (Walcott, 1978), определяя начальную ориентацию голубей, выпущенных в разных местах с аномалиями поля, обнаружил, что точность ориентации птиц (как в ясные, так и в облачные дни) обратно пропорциональна величине аномалии (рис. 12.5). Аналогичный эффект наблюдался и в Европе (Kiepenheuer, 1982). Пороговые изменения параметров поля опять-таки сравнимы с величиной, ожидаемой для магнитной картографической системы. Сравнение маршрутов полета из обычных мест и мест с магнитной аномалией показывает, что влияние аномалии довольно сильное и сохраняется до тех пор, пока птица не улетит достаточно

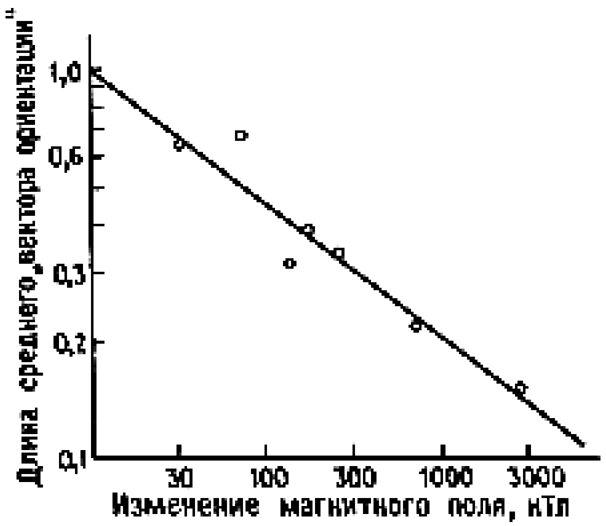


Рис. 12.5. Зависимость степени дезориентации голубей, выпущенных в месте с магнитной аномалией, от величины аномалии. Значение 1,0 соответствует среднему «вектору ориентации», доходящему до окружности на рис. 12.1, и отвечает случаю, когда все птицы ориентируются одинаково; если вектор более короткий, это означает, что существует разброс в ориентациях.

далеко (Gould, 1982 a, b, на основе данных из Walcott, 1978; см. рис. 12.6). Голуби, оказавшиеся в местах с большим градиентом магнитного поля (в противоположность примерам нерегулярных аномалий, приведенных Уолкоттом), как правило, летят вдоль градиента независимо от того, где находится дом (Wagner, 1976; Frei, Wagner, 1976). Поскольку в аномалиях напряженность поля почти всегда очень велика, такое поведение имеет смысл: перемещаясь вдоль градиента, птица скорее минует аномалию, чем перемещаясь поперек него. Аналогичные эффекты, но менее документированные описаны также в работах других авторов (Graue, 1965; Talkington, 1967).

Довольно трудно объяснить неспособность голубей правильно ориентироваться при наличии магнитных аномалий чем-либо иным, кроме влияния этих аномалий на «магнитное чувство» или «чувство карты». Тем не менее Уолкотт (частное сообщение) не исключает и еще одной возможности: большинство магнитных аномалий порождается крупными залежами железа, содержащими магнетит, а это приводит также к небольшим гравитационным аномалиям. Поскольку сила тяжести немного меняется (более или менее равномерно) от экватора к полюсу, теоретически она тоже может использоваться при построении «карты». Более того, имеются данные о корреляции (правда, очень слабой) между точностью ориентации голубя и фазой Луны; если эти данные подтвердятся, то их можно будет объяснить влиянием Луны на силу тяжести в том месте, где был выпущен голубь (Larkin, Keeton, 1978). Чтобы окончательно решить этот вопрос, нужно исследовать влияние на ориентацию чисто гравитационных аномалий; такие эксперименты уже проводятся Уолкоттом (частное сообщение).

Наконец, есть данные о том, что если перенести голубя в место, где имеется аномальное, но *четко контролируемое* магнитное поле, то его начальная ориентация также может измениться (Kiepenheuer, 1978; Papi et al., 1978; Wiltschko, Wiltschko, 1978; Wiltschko et al., 1978). Подобные результаты трудно объяснить, поскольку (1) после освобождения птицы имеют возможность попасть в нормальное поле и (2) существуют другие

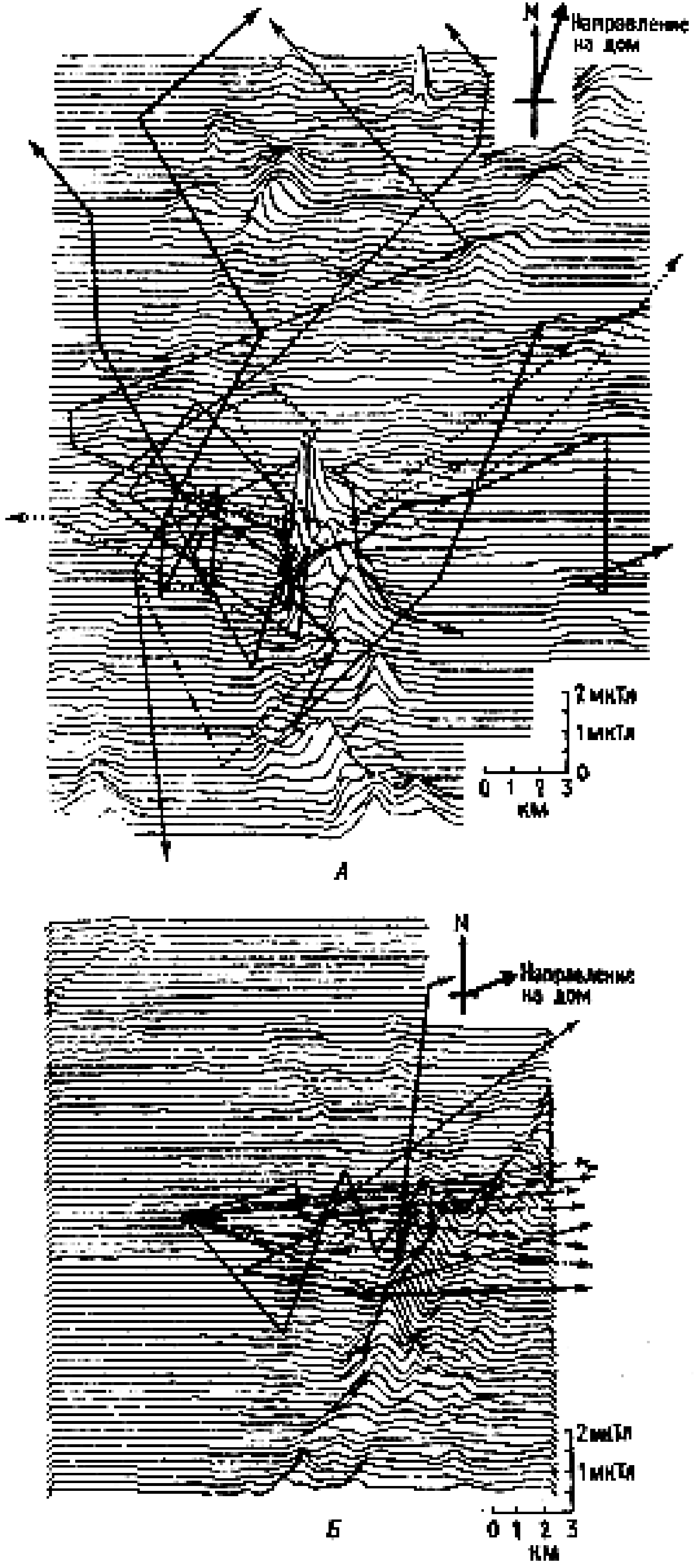


Рис. 12.6. Влияние магнитной аномалии на поведение голубей четко проявляется при сравнении маршрута птиц, выпущенных на Айрон-Майн-Хилл в Род-Айленде (*А*; это соответствует самой правой точке на рис. 12.5), и птиц, выпущенных в Ворчестере, шт. Массачусетс, где магнитных аномалий не наблюдается (*Б*). (Рисунок заимствован из работы Gould, 1982a и выполнен на основании данных работы Wallcott, 1978 и U.S. Geological Survey.)

эксперименты (цитированные выше), в которых использовались аналогичная методика и был отмечен лишь очень слабый эффект. Как уже указывалось в обзоре Gould, 1982b, вся совокупность данных свидетельствует против гипотезы Мэтьюза (sun-arc hypothesis); в то же время еще одна известная теория, объясняющая природу «чувства карты» у голубей,– обонятельная гипотеза Папи – значительно менее правдоподобна, чем магнитная, и ее экспериментальная основа крайне не надежна. Итак, можно полагать,что в формировании «чувства карты» у голубей какую-то роль играет информация о магнитном поле Земли.

4. Трудности, с которыми сталкивается гипотеза магнитной карты

Гипотеза магнитной карты имеет несколько слабых мест. Прежде всего необходимо объяснить тот факт, что способность к ориентации голубей, к телу которых прикреплен магнит или катушка, в солнечные дни почти не изменяется (Keeton, 1971; Walcott, Green, 1974). В то же время более тщательный анализ этих данных показывает, что у голубей с магнитами или катушками наблюдаются такие же отклонения при ориентировке на цель, как и у голубей без таких устройств во время магнитных бурь (Larkin, Keeton, 1976). Как уже отмечалось, данные о влиянии магнитных бурь на ориентацию голубей гораздо лучше согласуются с гипотезой магнитных карт, чем с какими-либо «компасными» теориями. Чтобы магнитное «чувство карты» могло существовать, голуби должны ощущать сравнительно малые (величиной в десятки или сотни нанотесл) различия в величине поля вблизи голубятни и в том месте, где они были выпущены, на фоне сильного основного поля, причем независимо от того, является ли это фоновое поле обычным (~50000 нТл) или аномально большим. О том, что у голубей дело обстоит именно так, свидетельствуют следующие данные: голуби, снабженные магнитами и выпущенные в солнечный день в месте с магнитной аномалией, с очевидностью реагируют на нее (Walcott, 1980b). Поскольку аномальное поле величиной 1000 нТл дезориентирует голубя независимо от того, находится ли он в нормальном поле величиной 50000 нТл или в аномальном поле в сотни тысяч нанотесл, представляется вполне возможным, что он способен ощущать столь малые изменения поля, что они могут быть использованы при построении «карты» (причем в области аномалии эти изменения могут вводить его в заблуждение).

Более серьезная проблема связана с тем, что из информации о геомагнитном поле можно сравнительно легко получить лишь одну координату для построения «карты», тогда как необходимы по крайней мере две координаты. Можно возразить, что поле характеризуется тремя параметрами: горизонтальной и вертикальной составляющими и магнитным склонением (отклонением от направления на истинный север). Однако такой параметр, как склонение, нельзя использовать, если неизвестно направление на истинный север, так что в отсутствие солнца (с помощью которого скорее всего и находится это направление) данный параметр не может использоваться для ориентации. Вертикальная и горизонтальная составляющие поля изменяются регулярным образом при перемещении от магнитного экватора к полюсам, но на северо-востоке США линии их градиентов пересекаются под углом 15-30°. Если животные в состоянии регистрировать эти величины независимо (а для этого необходимо также определять положение тела относительно, скажем, направления силы тяжести с точностью 10^{-4}), то карта будет иметь неортогональную сетку. Однако я думаю, что голуби используют полную напряженность поля (для этого не нужно измерять вертикальную составляющую) и вообще не заботятся о нахождении второй координаты: способность определять одну координату уже является громадным достижением, и нахождение других может оказаться значительно более простой задачей. Тем не менее тщательное изучение распределения полной напряженности поля в окрестности Итаки (которое гораздо менее регулярно, чем поле в Массачусетсе, Коннектикуте или Род-Айленде вокруг голубятни Уолкотта) позволяет предположить, что строится все-таки двухкомпонентная карта, а если однокомпонентная; то в ней используется в качестве координаты наклонение (в обоих случаях, по-видимому, лучше чувствуются детальные особенности поля).

Еще одно слабое место гипотезы магнитной карты состоит в том, что не идентифицирован орган, который обеспечивал бы достаточную чувствительность, хотя некоторые животные, например рабочие пчелы, несомненно обладают чувствительностью, необходимой для построения «карты» (Gould, 1980a). Можно возразить, что обычно поведенческие данные предшествуют появлению физиологических подтверждений, однако о существовании компасного магнитного чувства известно уже два десятилетия и тем не менее, за двумя исключениями, никаких согласованных объяснений это явление не получило. Исключениями являются пластиножаберные рыбы (акулы и скаты), которые могут использовать свои электрочувствительные органы для определения направления (Kalmijn, 1978, 1982), и некоторые одноклеточные организмы (несколько видов бактерий и подвижных водорослей), содержащие цепочки из магнетитных гранул (Blakemore, 1975; Frankel et al., 1979; Frankel, Blakemore, 1980; Kirschvink, 1980; Barros et al., 1982). Проводником, замыкающим электрическую цепь, служит у пластиножаберных рыб морская вода (Kalmijn, 1978). Этот способ, по-видимому, не могут использовать другие рыбы и наземные животные. Ни пластиножаберные рыбы, ни магнитотаксические бактерии и водоросли не обладают чувствительностью, достаточной для построения «карты».

Довольно большое количество магнетита обнаружено у самых разных животных: рабочих пчел (Gould et al., 1978), почтовых голубей (Walcott et al., 1979) дельфинов (Zoeger, Fuller, 1981), тунцов и лососей

(Walker et al., 1979; см. также гл. 20), бабочек-монархов (Jones, McFadden, 1982), морских черепах (гл. 21), полевых мышей (Mather, Baker, 1981), крыс (гл. 23) и т. д. Более того, количество магнетитных кристаллов достаточно для обеспечения чувствительности, необходимой для существования «чувства карты» (Kirschvink, Gould, 1981), если предположить, что нервная система суммирует сигналы от многих рецепторов и усредняет их (именно такой способ повышения чувствительности применяется во многих сенсорных системах).

5. Будущие исследования

Несмотря на то что гипотеза о существовании магнетитной картографической системы представляется вполне правдоподобной, никаких конкретных путей к ее окончательной проверке не найдено. Здесь возможны два типа экспериментов: поведенческие и физиологические. Весьма убедительными были бы данные нейрофизиологической активности у животных, способных к магниторецепции, которые указывали бы на уровень их чувствительности. С другой стороны, очень важным мог бы оказаться и такой эксперимент, в котором животное транспортировали бы в тщательно контролируемом поле – таком, чтобы оно содержало информацию о перемещении в направлении, противоположном реальному, и перед тем как выпустить на волю, к телу животного прикрепляли катушку, с помощью которой индуцировались бы небольшие изменения поля, соответствующие ложному перемещению. Ясно, однако, что контролировать вне лаборатории все три компоненты поля с точностью 10 нТл крайне трудно, тем более что мы не знаем, какие именно компоненты поля использует животное. Другой подход состоит в манипулировании информацией, предположительно используемой при построении «карты», как это делалось в опытах Вилчко: птицы, помещенные в клетки, проявляли миграционное беспокойство, прыгая в определенном направлении. Особенно интересно проследить за птицами, имеющими два пути миграции, как, например, европейские певчие птицы (Gwinner, Wiltschko, 1978; Wiltschko, 1982), чтобы понять, где именно они меняют направление движения и почему останавливаются в надлежащем месте. Наконец, возможен тщательный анализ влияния магнитных бурь на поведение с точной записью всех трех компонент поля в месте проведения эксперимента. Он должен выявить, какая из компонент поля используется и на каком уровне осуществляется влияние бурь (в тот момент, когда определяется «базовая линия» направления на дом, или в момент, когда животное выпускают на волю? по какому интервалу времени производится усреднение для исключения шума? и т. д.)?

Литература

Blakemore R. P. (1975). Magnetotactic bacteria, Science, **190** 377-379.

Brines M. L., Gould J. L. (1979). Bees have rules, Science, **206**, 571-573.

Carr H. P., Switzer W. P., Hollander W. F. (1982). Evidence for interference with navigation of homing pigenos by a magnetic storm, Iowa State J. Res., **56**, 327-340.

Dyer F. C., Gould J. L (1981). Honey bee orientation: A backup system for cloudy days, Science, **214**, 1041-1042.

Frankel R. B., Blakemore R. P. (1980). Navigational compass in magnetic bacteria, J. Magn. Magn. Mater., **15-18**, 1562-1564.

Frankel R. B., Blakemore R. P., Wolfe R. S. (1979). Magnetite in freshwater magnetic bacteria, Science, **203**, 1355-1357.

Frei U., Wagner G. (1976). Die Anfangsorientierung von Brieftauben in erdmagnetisch gestörten Gebiet des Mont Jorat., Rev. Suisse Zool., **83**, 891-897.

Gould J. L. (1980). The case for magnetic sensitivity in birds and bees (such as it is). Am. Sci., **68**, 256-267.

Gould J. L. (1982). Ethology: The Mechanisms and Evolution of Behavior, Norton, New York.

Gould J. L. (1982b). The map sense of pigeons, Nature, **296**, 205-211.

Gould J. L., Kirschvink J. L., Deffeyes K. S. (1978). Bees gave magnetic remanence, Science, **202**, 1026-1028.

Graue L. C. (1965). Initial orientation in pigeon homing related to magnetic contours, Am. Zool., **5**, 704.

Griffin D. R. (1943). Homing experiments with herring gulls and common terns, Bird Banding, **14**, 7-33.

Grüter M., Wiltschko R., Wiltschko W., 1982. Distribution of release-site biases around Frankfurt. In: Avian Navigation (F. Pari and H. G. Wallraff, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 222-231.

Gwinner E., Wiltschko W. (1978). Endogenously controlled changes in migratory direction of the garden warbler, J. Comp. Physiol., **125**, 267-273.

Hachet-Souplet P. (1911). L'instinct du retour chez le pigeon voyageur, Rev. Sci., **29**, 231-238.

Huizinger E. (1935). Durchschneidung aller bogengänge by der Taub, Pflugegers Arch. Gesamte Physiol. Menschen Tiere, **236**, 52-88.

Jones D. S., McFadden B. J. (1982). Induced magnetization in the monarch butterfly, Danaus plexippus, J. Exp. Biol., **96**, 1-9.

Kalmijn A. J., 1978. Experimental evidence of geomagnetic orientation in elasmobranch fishes, In: Animal Migration, Navigation, and Homing (K. Schmidt-Koenig and W. T. Keeton, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 135-142.

Kalmijn A. J., (1982). Electric and magnetic field detection in elastobranch fishes, Science, **218**, 916-918.

Keeton W. T. (1971). Magnets interfere with pigeon homing, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **68**, 102-106.

Keeton W. T. (1974a). The orientational and navigational basis of homing in birds, Adv. Study Behav., **5**, 47-132.

Keeton W. T. (1974b). The mystery of pigeon homing, Sci. Am., **231**(6), 96-107.

Keeton W. T., Larkin T. S., Windsor D. M. (1974). Normal fluctuations in the earth's magnetic field influence pigeon orientation, J. Comp. Physiol., **95**, 95-103.

Kiepenheuer J. (1978). Inversion of the magnetic field during transport: Its influence on the homing behavior of pigeons, In: Animal Migration, Navigation, And Homing (K. Schmidt-Koenig, W. T. Keeton, eds.), Springer-Verlag, pp. 135-142.

Kiepenheuer J., 1982. The effect of magnetic anomalies on the homing behavior of pigeons. In: Avian Navigation (F. Pari and H. G. Wallraff, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 120-128.

Kirschvink J. L. (1980). South-seeking magnetic bacteria, J. Exp. Biol., **86**, 345-347.

Kirschvink J. L., Gould J. L. (1981). Biogenic magnetite as a basis for magnetic field detection in animals, BioSystems, **13**, 181-201.

Kluijver H. W. (1935). Ergebnisse eines Versuches über das Heimfindevermögen von Staren, Ardea, **24**, 227-239.

Larkin T. S., Keeton W. T. (1976). Bar magnets mask the effect of normal magnetic disturbances on pigeon orientation, J. Comp. Physiol., **110**, 227-239.

Larkin T. S., Keeton W. T. (1978). An apparent lunar rhythm in the day-to-day variation in the initial bearings of homing pigeons. In: Animal Migration, Navigation, and Homing (K. Schmidt-Koenig and W. T. Keton, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 92-106.

Lednor A. J., 1982. Magnetic navigation in pigeons: Possibilities and problems. In: Avian Navigation (F. Papi and H. G. Wallraff, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 109-119.

Lins de Barros H. G. P., Esquivel D. M. S., Danon J., Oliveira L. P. H., Magnetotactic algae, Acad. Bras. Cienc. Notas Fis CBPF-NF-048/81.

Mather J. G., Baker R. R. (1981). Magnetic sense of direction in woodmice for route-based navigation, Nature, **291**, 152-155.

Moore B. (1980). Is the homing pigeon's map geomagnetic? Nature, **285**, 69-70.

Moore F. (1977). Geomagnetic disturbance and the orientation of nocturnally migrating birds, Science, **196**, 682-684.

Papi F., Ioale P., Fiaschi V., Benvenuti S., Baldaccini N. E., 1978. Pigeon homing: Gues detected during the outward journey influence initial orientation. In: Animal Migration, Navigation, and Homing (K. Schmidt-Koenig and W. T. Keeton, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 65-77.

Schmidt-Koenig K., Walcott C. (1978). Tracks of pigeons homing with frosted lenses, Anim. Behav., **26**, 480-486.

Schreiber B., Rossi O. (1976). Correlation between race arrivals of homing pigeons and solar activity, Boll. Zool., **43**, 317-320.

Schreiber B., Rossi O. (1978). Correlation between magnetic storms due to solar spots and pigeon homing performances. IEEE Trans Magn., **Mag-14**, 961-963.

Schreiber B., Rossi O. (1979). Observations on the homing behavior of pigeons during geomagnetic storms of solar origin, Ital. J. Zool., **13**, 215-216.

Talkington L. (1967). Bird navigation and geomagnetism, Am. Zool., 7, 199.

von Frisch K., 1967. The Dance Language and Orientation of Bees, Harvard University Press, Cambridge, Mass.

Wagner G. (1976). Das Orientierungsverhalten von Brieftauben im erdmagnetisch gestörten Gebiete des Chasseral, Rev. Suisse Zool., **83**, 883-890.

Walcott C., 1978. Anomalies in the earth's magnetic field increase the scatter of pigeon's vanishing bearings. In: Animal Migration, Navigation, and Homing (K. Schmidt-Koenig and W. T. Keeton, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 143-151.

Walcott C., (1980a). Magnetic orientation in homing pigeons, IEEE Trans. Magn., **Mag-16**, 1008-1013.

Walcott C., (1980b). Homing-pigeon vanishing bearings at magnetic anomalies are not altered by bar magnets, J. Exp. Biol., **70**, 105-123.

Walcott C., 1982. Is there evidence for a magnetic map in homing pigeons? In: Avian Navigation (F. Papi and H. G. Wallraff, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 99-108.

Walcott C., Green R. P. (1974). Orietation of homing pigeons is altered by a change in the direction of an applied magnetic field, Science, **184**, 180-182.

Walcott C., Gould J. L., Kirschvink J. L. (1979). Pigeons have magnets, Science, **205**, 1027-1029.

Walcott C., Schmidt-Koenig K. (1973). The effect on pigeon homing of anesthesia during displacement, Auk., **90**, 281-286.

Wallraff H. G. (1965). Über das Heimfindevermögen von Brieftauben mit durchtrenuten Bogenängen, Z. Vol. Physiol., **50**, 313-330.

Wallraff H. G. (1972). Homing of pigeons after extirpation of their cochleae and lagenae, Nature, **263**, 223-224.

Wallraff H. G. (1980a). Does pigeon homing depend on stimuli perceived during displacement? I, J. Comp. Physiol., **139**, 193-201.

Wallraff H. G. (1980b). Does pigeon homing depend on stimuli perceived during displacement? II. J. Comp. Physiol., **139**, 203-208.

Wiltschko R., Wiltschko W., Keeton W. T., 1978. Effect of outward journey in an altered magnetic field on the orientation of young homing pigeons. In: Animal Migration, Navigation, and Homing (K. Schmidt-Koenig and W. T. Keeton, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 152-161.

Wilschko R., Wiltschko W. (1978). Evidence for the use of magnetic outward-journey information in homing pigeons, Naturwissenschaften, **65**, 112-113.

Wiltschko R., Nohr D., Wiltschko W. (1981). Pigeon with a deficient sun compass use the magnetic compass, Science, **214**, 343-345.

Wiltschko W., 1982. The migratory orientation of garden warblers. In: Avian Navigation (F. Papi and H. G. Wallraff, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 50-58.

Wiltschko W., Wiltschko R. (1972). Magnetic compasses of European robins, Science, **176**, 62-64.

Wiltschko W., Wiltschko R., Keeton W. T. (1976). Effects of a «permanent» clock-shift on the orientation of young homing pigeons, Behav. Ecol., Sociobiol., **1**, 229-243.

Windsor D. M., 1972. Directional preferences and their relation to navigation in homing pigeons, Dissertation, Cornell University.

Windsor D. M. Regional expression of directional preferences by experienced homing pigeons, Anim, Behav., **23**, 335-343.

Yeagley H. L. (1947). A preliminary study of a physical basis of bird navigation, J. Appl. Phys., **18**, 1035-1063.

Yeagley H. L. (1951). A preliminary study of a physical basis of bird navigation, II, J. Appl. Phys., **22**, 746-760.

Zoeger J., Fuller M. (1981). Magnetic material in the head of the common Pacific dolphin, Science, **213**, 892-894.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редакторов перевода . . . 5

Предисловие . . . 8
Литература . . . 12

Часть I. ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМУ

Глава 1. Биоминерализация железа: геобиологический подход. *Хайнц А. Ловенстам, Джозеф Л. Киршвинк* . . . 15
1. Введение . . . 15
2. Особенности процессов минерализации железа в живых организмах 18
3. Биологические функции процессов биоминерализации железа . . . 23
4. Геологические особенности оксидов и сульфидов железа биогенного происхождения . . . 24
Примечание . . . 28
Литература . . . 29

Глава 2. Ферримагнетизм магнетита. *Субир К. Банерджи, Брюс М. Московитц* . . . 32
1. Введение . . . 32
2. Основные понятия . . . 32
3. Основные магнитные свойства . . . 36
4. Магнитные доменные состояния . . . 39
5. Остаточная намагниченность . . . 50
6. Магнитная гранулометрия . . . 56
Литература . . . 59

Глава 3. Геомагнитное поле, его природа, история и значение для биологии. *Дюрвард Д. Скайлс* . . . 63
1. Введение . . . 63
2. Главное геомагнитное поле . . . 69
3. Поле внешнего происхождения . . . 125
Литература . . . 138

Часть II. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ

Глава 4. Использование сквид-магнитометров в биомагнитных исследованиях. *М. Фуллер, В. Гори, В. Гудман* . . . 147
1. Введение . . . 147
2. Принципы действия сквидов . . . 148
3. Криогенное обеспечение . . . 170
4. Конструкции измерительных приборов . . . 182
5. Применение сквид-магнитометров в биомагнитных исследованиях 190
6. Заключение . . . 205
Литература . . . 206

Глава 5. Обнаружение, выделение и характеристика биогенного магнетита. *М. М. Уокер, Дж. Л. Киршвинк, А. Перри, А. Дайзон* 209
1. Введение . . . 209
2. Магнитометрические исследования . . . 211

3. Выделение и характеристика биогенного магнетита . . . 216
4. Обсуждение . . . 220
5. Краткое содержание . . . 222
Благодарности . . . 223
Литература . . . 223

Глава 6. Исследование минеральных частиц биогенного происхождения методами просвечивающей электронной микроскопии и электронной дифракции; некоторые рекомендации. *Кеннет М. Тоу* . . . 225
1. Введение . . . 225
2. Подготовка образцов для электронной микроскопии . . . 226
3. Изучение образца в микроскопе . . . 234
4. Анализ порошковых картин дифракции электронов . . . 242
5. Заключение . . . 243
Литература . . . 244

Глава 7. Локализация гранулярных включений железа в клетках. *Бенджамин Уолкот* . . . 246
1. Введение . . . 246
2. Анатомические методики . . . 247
3. Примеры: шмель . . . 253
4. Заключение . . . 260
Литература . . . 262

Глава 8. Магнитоэкранированные комнаты большого объема: конструкции и материалы. *Гейри Р. Скотт, Клифф Фролих* . . . 263
1. Введение . . . 263
2. Общие принципы электрического и магнитного экранирования . . . 266
3. Конструирование магнитоэкранированных комнат . . . 276
4. Три примера . . . 284
5. Краткое содержание . . . 289
Благодарности . . . 290
Литература . . . 290

Часть III. МАГНИТОРЕЦЕПЦИЯ: ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ

Глава 9. Ограничения при рассмотрении индукционной гипотезы магниторецепции. *Брюс Розенблюм, Роджер Л. Юнгерман, Лоран Лонгфеллоу* . . . 293
1. Введение . . . 293
2. Влияние шума; общие положения . . . 294
3. Орган, ответственный за индукционную магниторецепцию . . . 296
4. Заключение . . . 304
5. Дополнение: несколько слов о навигации . . . 304
Литература . . . 305

Глава 10. Энергетический подход к оценке чувствительности ферромагнитных магниторецепторов. *Эллен Д. Йорк* 306
1. Введение . . . 306

2. Энергетический подход . . . 307
3. Время отклика . . . 308
4. Чувствительность к изменениям поля . . . 312
5. Другие типы детекторов . . . 314
6. Проверки гипотез . . . 315
Литература . . . 317

Глава 11. Размер частиц в магнетитных магниторецепторах. *Джозеф Л. Киршвинк, Майкл М. Уокер* . . . 319

1. Введение . . . 319
2. Модель восприятия напряженности поля; тепловые флуктуации . . . 324
3. Обсуждение . . . 328
4. Краткое содержание . . . 331
Литература . . . 331

Глава 12. Существуют ли у животных магнитные карты? *Джеймс Л. Гоулд* . . . 334

1. Введение . . . 334
2. «Компасное» чувство . . . 336
3. «Чувство» карты» . . . 338
4. Трудности, с которыми сталкивается гипотеза магнитной карты . . . 344
5. Будущие исследования . . . 346
Литература . . . 347

Научное издание

Ловенстам Хайнц, Киршвинк Джозеф, Банерджи Субир и др.

БИОГЕННЫЙ МАГНЕТИТ И МАГНИТОРЕЦЕПЦИЯ.

Новое о биомагнетизме

Под ред. Джозефа Киршвинка, Дугласа Джонса, Брюса Мак-Фаддена

В двух томах

ТОМ 1

Заведующий редакцией чл.-корр. АН СССР Т. М. Турпаев. Зам. зав. редакцией М. Д. Гроздова. Ст. научные редакторы Н. Н. Шафрановская и В. А. Пантаева. Научный редактор Т. И. Пономарева. Мл. научный редактор З. В. Соллертинская. Мл. редактор О. В. Шагинян. Художник А. А. Лукьяненко. Художественный редактор А. Я. Мусин. Технический редактор Т. А. Максимова. Корректор В. И. Николаева.

ИБ № 6427

Сдано в набор 29.03.88. Подписано к печати 21.11.88. Формат 60 × 90[1]/[16]. Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Гарнитура таймс. Объем 11 бум. л. Усл. печ. л. 22. Усл. кр.-отт. 44. Уч.-изд. л. 23,88. Изд № 4/5403. Тираж 4650 экз. Зак. 415. Цена 3 р. 80 к.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» В/О «Совэкспорткнига» Государственного комитета СССР по делам издательств полиграфии и книжной торговли, 129820, ГСП, Москва, И-110, 1-й Рижский пер., 2

Можайский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, г. Можайск, ул. Мира, 93.